

Kaleidoskop - Farbenspiel

Themenspektrum - Alles über Farben

Inhalt

Artikel

Absorption (Physik)	1
Additive Farbmischung	6
Auge	9
Bildschirm	22
Blau	26
Brechung (Physik)	33
Brechungsindex	35
CIE-Normvalenzsystem	44
CMYK-Farbmodell	52
Cyan	55
Dreifarbentheorie	61
Elektromagnetische Welle	62
Elektromagnetisches Spektrum	69
Entstehung von Farben	72
Falschfarben	75
Farbart	77
Farbe	79
Farbenblindheit	92
Farbenlehre	96
Farbfernsehen	103
Farbfilm	108
Farbkreis	110
Farbmetrik	117
Farbmittel	120
Farbnachstellung	122
Farbraum	126
Farbreiz	139
Farbstoff	140
Farbsättigung	153
Farbtemperatur	160
Farbton	163
Farbvalenz	164
Farbwahrnehmung	165
Fluoreszenz	178

Färben	184
Färberwaid	189
Gegenfarbtheorie	192
Gelb	195
Glühlampe	203
Grundfarbe	223
Grün	227
Helligkeit	231
Infrarotstrahlung	233
Komplementärfarbe	239
Kontrast (Optik)	243
Körperfarbe	245
Lab-Farbraum	247
Laser	252
Leuchtdiode	275
Licht	291
Lichtfarbe	297
Lichtquelle	300
Lichtspektrum	303
Liste der Farben im Farbkreis	305
Magenta (Farbe)	308
Metamerie (Farblehre)	309
Netzhaut	312
Optik	321
Orange (Farbe)	326
Photon	329
Photopisches Sehen	333
Physik	334
Pigment	345
Polarisation	355
Prisma (Optik)	359
Reflexion (Physik)	362
Regenbogen	371
Remission (Physik)	384
RGB-Farbraum	385
Rot	396
Schwarz	405
Sonnenstrahlung	410

Spektralfarbe	413
Spektralklasse	416
Stäbchen (Auge)	421
Subtraktive Farbmischung	424
Ultraviolettstrahlung	426
Vierfarbdruck	437
Violett	440
Visuelle Wahrnehmung	444
Weiß	448
Wellenlänge	450

Referenzen

Quelle(n) und Bearbeiter des/der Artikel(s)	453
Quelle(n), Lizenz(en) und Autor(en) des Bildes	461

Artikellizenzen

Lizenz	470
--------	-----

Absorption (Physik)

Der Begriff **Absorption** (lat.: *absorptio* = Aufsaugung) bezeichnet im Allgemeinen *das Aufsaugen, das In-sich-Aufnehmen von etwas*, und ist nicht zu verwechseln mit der *Adsorption*.

In der Physik kann es sich um die Absorption (Dissipation) einer Welle in einem dämpfenden Stoff oder Körper handeln (elektromagnetische Wellen, Schallwellen) oder auch um die Absorption von Teilchenströmen (Partikelstrahlen) und Stoffströmen (Lösen von Stoffen ineinander).

Auf manchen Arbeitsgebieten hat der Begriff Absorption keine ganz feststehende Definition, sondern wird je nach dem gerade betrachteten Effekt etwas verschieden gebraucht. Beispiele dafür sind unten bei Röntgen- und Gammastrahlung und bei Neutronen genannt.

Absorption von Wellen und Teilchenstrahlen

Bei der Absorption von Wellen in einem absorbierenden, homogenen Material ist die Wahrscheinlichkeit der Absorption pro Weeinheit *bei niedrigen Energien* in jeder Eindringtiefe gleich. Dann gilt ein exponentielles Gesetz, das *Bouguer-Lambertsche Gesetz* (oft kurz Lambertsches Gesetz genannt, vergleiche aber Lambertsches Kosinusetz). Ist I_0 der ursprüngliche Strom, beträgt der nach Durchlaufen der Schichtdicke d noch vorhandene Strom $I(d)$:

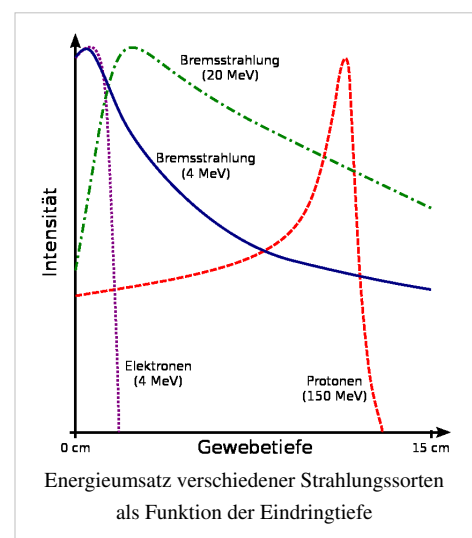
$$\frac{I(d)}{I_0} = e^{-\mu d} = \tau$$

(Herleitung des Gesetzes: siehe Absorptionsgesetz). Dabei ist μ der von den Eigenschaften des absorbierenden Materials und oft auch von der Energie (Quantenenergie, Teilchenart und -geschwindigkeit) der Strahlung abhängige *Absorptionskoeffizient*. Sein Kehrwert ist die Eindringtiefe. Aus ihm lässt sich die Dicke der Halbwertsschicht berechnen.

Häufig treten jedoch Nebeneffekte auf, die zu ganz anderen Gesetzmäßigkeiten führen, wie im nebenstehenden Bild zu sehen ist. Dafür gibt es unterschiedliche Ursachen:

- Entstehung von Sekundärelektronen, die im durchstrahlten Material ausgelöst werden.
- Bei *zu hohen* Geschwindigkeiten ionisieren Protonen nur schwach.
- Elektronen besitzen wegen ihrer elektrischen Ladung eine scharf begrenzte maximale Eindringtiefe. Faustregel: in Körpergewebe (Fleisch) pro 2 MeV 1 cm.
- Hochenergetischen Photonen und Elektronen ist gemeinsam, dass sie ihr Dosismaximum nicht auf der Hautoberfläche, sondern einige Millimeter tiefer abgeben.

Die relativ dicke Luftschicht der Erde wirkt gemeinsam mit ihrem Magnetfeld als sehr wirksamer Absorber bzw. Teilchen-Ablenker hin zu den Magnetpolen der Erde für hochenergetische Teilchen von der Sonne oder aus dem Weltall. Je nach Teilchensorte und -energie steigt deshalb die Strahlungsaktivität im Van-Allen-Gürtel sehr stark an, die Erdoberfläche ist sehr gut geschützt. In der Nähe der Magnetpole erzeugen diese Teilchen Polarlicht; siehe auch



Luftschauer.

Schall

Hauptartikel: Schallabsorption, Schalldämpfung.

Die Absorption von Schall findet durch Umwandlung der Leistung des Schalles (Luftschall, Körperschall, auch Erdbebenwellen) in thermische Energie in einem dämpfenden Medium oder an Grenzschichten – z. B. zwischen Luft, in der sich der Schall ausbreitet, und einer Festkörperoberfläche – statt. Sie ist unter anderem frequenz- und temperaturabhängig. Die Schallabsorption in Luft ist durch verschiedene thermodynamische Vorgänge bedingt, dabei ist sie in Gasen erheblich höher als in Festkörpern.

Elektromagnetische Wellen

Wenn elektromagnetische Strahlung in einem Material absorbiert werden kann, wird die Stärke der Absorption durch einen Materialparameter beschrieben, den Absorptionsgrad, der in der Regel von einer Vielzahl von Parametern (Temperatur, Wellenlänge) abhängig ist.

Licht

Die Lichtabsorption an Oberflächen oder beim Durchqueren von Materie ist im Allgemeinen material- und frequenzabhängig. Die Menge der auf dem Weg absorbierten oder gestreuten Photonen hängt neben dem frequenzabhängigen Extinktionskoeffizienten auch von Schichtdicke des Materials ab (vgl. Lambert-Beersches Gesetz).

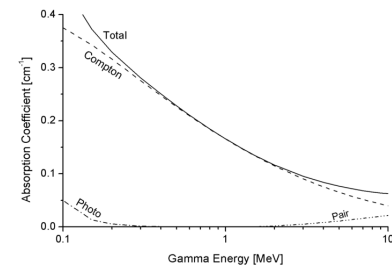
In Abhängigkeit von der möglichen Bandstruktur der Moleküle können verschiedene Frequenzbereiche des Lichts unterschiedlich absorbiert werden, d. h., je nach Farbe ist die Absorption unterschiedlich stark (siehe Resonanzabsorption, Fraunhoferlinien). Benachbarte Frequenzanteile werden je nach Material und Einfallswinkel des Lichtes entweder reflektiert oder transmittiert. Wird beispielsweise eine gelb erscheinende Oberfläche mit weißem Licht bestrahlt, wird das grüne und rote Licht reflektiert/transmittiert und blaues Licht absorbiert (vgl. Farbsynthese). Bei der Absorption von Licht wird die aufgenommenen Energie nicht nur in Wärme umgewandelt, sondern kann durch andere Mechanismen wie Fluoreszenz sowie durch Streuung an Aerosolen verlorengehen.

Wie bereits erwähnt, ist die Absorption (zum Teil stark) frequenzabhängig. Die Ursache liegt in der Bandstruktur des Materials, bei dem Photonen bestimmter Energie Atome oder Moleküle anregen, die Quantenübergänge mit genau dieser Energiedifferenz in der Elektronenhülle oder in ihren Molekülschwingungen (meist bei infrarotem Licht) besitzen. Grenzflächen verursachen eine zusätzliche, von der Brechzahldifferenz, der Einstrahlrichtung und der Polarisation abhängige Reflexion. Bei diffuser Reflexion spricht man in diesem Zusammenhang auch von Remission.

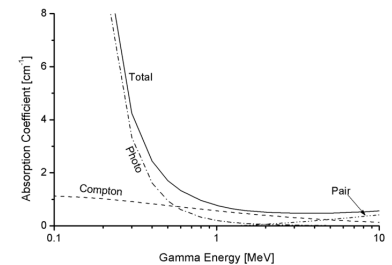
Der Lichtdurchgang durch eine Platte einschließlich Absorption kann direkt aus der komplexen Brechzahl über die Kramers-Kronig-Beziehungen abgeleitet werden. Damit wird die elektromagnetische Wechselwirkung direkt mit einer Materialeigenschaft in Beziehung gesetzt.

Röntgen- und Gammastrahlung

Auch beim Durchgang von Röntgen- und Gammastrahlung durch Materie ist die Wahrscheinlichkeit für Absorption der Dicke d des durchstrahlten Stoffes proportional. Daraus ergibt sich eine exponentielle Abnahme der Intensität mit der Dicke:



Der totale Absorptionskoeffizient μ von Aluminium (^{13}Al) für Gammastrahlung, als Funktion der Gammaenergie, und die Beiträge der drei einzelnen Prozesse. Der Comptoneffekt überwiegt im ganzen gezeigten Bereich.



Der totale Absorptionskoeffizient μ von Blei (^{82}Pb) für Gammastrahlung, als Funktion der Gammaenergie, und die Beiträge der drei einzelnen Prozesse. Der Photoeffekt überwiegt bei kleinen Energien; die Paarbildung beginnt bei 5 MeV zu überwiegen.

$$I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

Hier ist $\mu = n \cdot \sigma$ der Absorptionskoeffizient, gemessen in m^{-1} , n die Zahl der Atome im Material pro m^3 und σ der Wirkungsquerschnitt für Absorption. In der Optik (siehe oben) heißt dieses Gesetz das Lambertsche Gesetz. Man kann die Schwächung des Strahls auch durch eine Halbwertsdicke beschreiben; diese ist dem Absorptionskoeffizienten umgekehrt proportional.

Prozesse mit Energieverlust

Oft werden zur Absorption (nur) diejenigen Prozesse gezählt, bei denen ein Photon seine Energie teilweise oder ganz abgibt. Im Energiebereich der Gammastrahlung sind das:

- der photoelektrische Effekt, bei dem ein Elektron mit der Energie des Photons (verringert um die Ionisationsenergie des betroffenen Atoms) freigesetzt wird,
- der Comptoneffekt: das Photon gibt seine Energie teilweise an ein Elektron ab, und das gestreute Photon hat eine verringerte Energie,
- bei Energien von mindestens 1,022 MeV die Paarbildung in der Nähe eines Atomkerns: an Stelle des Photons entstehen ein Positron und ein Elektron.

Der Wirkungsquerschnitt für jeden dieser Prozesse hängt von der Energie des Photons und der Ordnungszahl des Materials ab. Der photoelektrische Effekt überwiegt für kleine Energien und hohe Ordnungszahl, die Paarbildung für

hohe Energien und hohe Ordnungszahl, der Comptoneffekt für mittlere Energien und niedrige Ordnungszahl.

Der Gesamt-Wirkungsquerschnitt ist die Summe aus den Einzelquerschnitten der verschiedenen Prozesse, für die so definierte Absorption also:

$$\sigma = \sigma_{\text{Photo}} + \sigma_{\text{Compton}} + \sigma_{\text{Paar}}.$$

Die freigesetzten Elektronen aus allen drei Prozessen können ihrerseits bei genügender Energie weiter ionisierend wirken.

Abschwächung des einfallenden Strahls

Zur Absorption wird aber manchmal auch jeder Prozess gezählt, der ein Photon aus dem einfallenden Strahlenbündel entfernt, mit oder ohne Energieumsetzung. Dann muss bei Gamma- und Röntgenstrahlung auch die Rayleigh-Streuung mit berücksichtigt werden, die nur die Flugrichtung des Photons ändert. Der Gesamtwirkungsquerschnitt ist dann

$$\sigma_2 = \sigma_{\text{Photo}} + \sigma_{\text{Compton}} + \sigma_{\text{Paar}} + \sigma_{\text{Rayleigh}}.$$

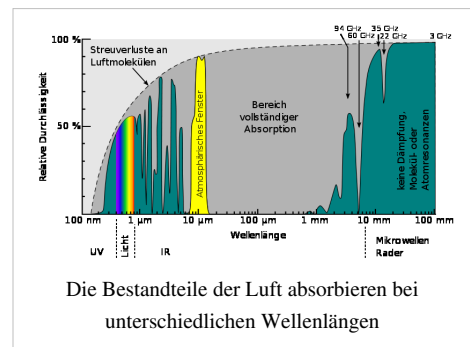
Für beide "Arten" der Absorption gilt mit gewissen Idealisierungen (z. B. für einen dünnen, linienförmigen Strahl) die beschriebene exponentielle Abnahme, aber Absorptionskoeffizient und Halbwertsdicke sind naturgemäß in den beiden Fällen verschieden. Bei Durchstrahlung etwa einer dicken, massiven Wand gilt die exponentielle Abnahme nicht, weil es hier z.B. auch zur Hineinstreuung in den Strahl kommt.

Fernerkundung

In der Fernerkundung bezieht sich der Ausdruck Absorption auf das Aufnehmen von elektromagnetischer Strahlungsenergie durch die Atmosphäre oder die Erdoberfläche. So wird vorübergehend Energie gespeichert und entsprechend dem Planckschen Strahlungsgesetz in irgend eine Richtung wieder emittiert. So reemittiert die durch die Sonne erwärmte Erdoberfläche Strahlung im Wellenlängenbereich des mittleren Infrarot (etwa 8 bis 14 μm). Diese Strahlung wird durch Wolken oder Treibhausgase absorbiert und so verzögert in den Weltraum bzw. wieder zur Erde reemittiert (Treibhauseffekt). Daher wird es in klaren Nächten kälter als in bedeckten.

LIDAR ist in der Lage, ein Schichtprofil der Konzentration von Spurengasen zu liefern. Hierbei wird mit speziellen Wellenlängen gearbeitet, die die Moleküle der Spurengase selektiv anregen und so absorbiert und reemittiert werden. Auch ein Profil der Windgeschwindigkeit kann gewonnen werden (Doppler-Verschiebung rückgestreuter Strahlung). Farb- bzw. wellenlängenabhängige Absorption der Erdoberfläche hilft, zwischen verschiedenen Bedeckungen zu unterscheiden. Man nutzt den sichtbaren und den infraroten Spektralbereich, um Vegetationsarten und Temperaturen zu bestimmen.

Mit satellitengestütztem Radar kann man Oberflächenprofile gewinnen, aber auch Wellenfrequenz und -höhe bestimmen.



Funkwellen

Funkwellen zur Nachrichtenübertragung oder beim Radar werden in der Atmosphäre durch freie Ladungsträger (Ionisierung) sowie Regen und Schnee bzw. Hagel absorbiert, reflektiert und gestreut.

So breiten sich Mittelwellen tagsüber schlecht aus (Ionisierung der unteren Atmosphäre durch Sonnenstrahlung), nachts dagegen gut. Funkwellen großer Wellenlänge (Mittel- und Kurzwelle) werden unter flachem Winkel an der Unterseite der Ionosphäre reflektiert; Kurzwellen gelangen so um die gesamte Erde.

Während die Absorption von Mikrowellen an Niederschlag bei der Nachrichtenübertragung oft große Probleme bereitet (Richtfunk, Up- und Down-Links der Satellitenkommunikation), ist man mit Niederschlagsradar (bodengestützt) bzw. Wetterradar an Bord von Schiffen und Flugzeugen in der Lage, Niederschlagsgebiete und sogar deren Tropfen- bzw. Hagelkorngröße sowie die Windgeschwindigkeit zu bestimmen. Hier ist die Rayleigh-Streuung maßgeblich – je geringer die Wellenlänge, desto stärker streuen Partikel mit Abmessungen wesentlich unterhalb der Wellenlänge. Die Windgeschwindigkeit wird anhand der Doppler-Verschiebung der rückgestreuten Wellen bestimmt.

Bei Sonnenstürmen kann es zum Erliegen des Funkverkehrs kommen, wenn die Atmosphäre bis in niedrige Schichten ionisiert wird und Funkwellen absorbiert.

Zur Realisierung von Funkmesszellen müssen die Wände entweder hohen Absorptionsgrad besitzen oder möglichst große Oberfläche, wie im Bild gezeigt. Dann genügt auch geringerer Absorptionsgrad des Materials. Wegen der sehr unruhigen Oberfläche können auch kaum gerichtete Reflexionen auftreten.



Wandoberfläche zur Absorption von Funkwellen

Freie Neutronen

Auch in der Neutronenphysik wird der Begriff Absorption nicht einheitlich verwendet. Als Absorption kann einerseits vom kernphysikalischen Standpunkt jede Aufnahme eines freien Neutrons in einen Atomkern bezeichnet werden, gleichgültig, wie der Kern sich danach verhält. Ein Urankern kann sich z.B. nach der Absorption spalten. Dabei werden 2 bis 3 Neutronen freigesetzt; die Absorption hat dann zu einer Neutronenvermehrung geführt.

In der Reaktorphysik und Physik der Fusionsreaktor-Blankets dagegen geht es oft um die Berechnung einer Neutronen"bilanz". Hier wird unter *Absorption* alles zusammengefasst, was die Gesamtzahl der freien Neutronen im betrachteten Volumen verringert, wie z. B. (n, γ) -, (n, p) -, (n, α) -Reaktionen. Prozesse wie die Kernspaltung oder $(n, 2n)$ -Reaktionen zählen hier dagegen zur *Produktion*, weil sie die Neutronenzahl erhöhen.

Siehe auch

- Extinktion (Optik) (optische Dichte (ND) = Absorbanz)
- Absorptionsspektrum, Absorptionsbande
- Abschirmung (Strahlung), Resonanzabsorption

Weblinks

- Interaktive Darstellung von Absorption, Emission und der stimulierten Emission ^[1]
- *Absorption solarer Strahlung in der Atmosphäre* ^[2]. Institut für Physische Geographie (IPG). Abgerufen am 27. September 2010.

Referenzen

[1] <http://www.activeart.de/dim-shops/demo/lichtMaterie>

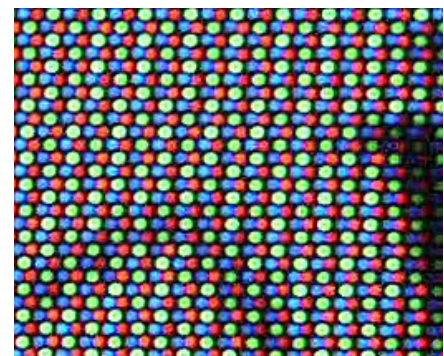
[2] http://www.webgeo.de/k_308/

Additive Farbmischung

Die **Additive Farbmischung**, auch **Additive Farbsynthese** oder **Physiologische Farbmischung** ist ein Phänomen, welches die Änderung des vom Auge empfundenen Farbeindrucks durch sukzessives Hinzufügen eines jeweils anderen Farbreizes beschreibt (additiv = hinzufügend). Werden zum Beispiel die drei Primärfarben *Rot*, *Grün* und *Blau* „gleichmäßig“ (mithin in geeigneter Helligkeit) addiert, entsteht die Farbempfindung *Weiß*. Die Empfindung ist *Schwarz*, wenn die Summe Null ist (kein Licht). Die Summen aus zwei Primärfarben bewirken die Empfindungen *Gelb*, *Cyan* und *Magenta*. Die Additive Farbmischung findet vorwiegend in Auge und Gehirn statt, weshalb sie auch Physiologische Farbmischung genannt wird.

Als *additive Farbmischungen* werden auch alle Verfahren bezeichnet, nach denen die im Auge zu addierenden Farbreize erzeugt werden:

- enge Bündel von unterschiedlich farbigen Lichtquellen (zum Beispiel auf Bildschirmen oder Monitoren) oder Farbtupfern (zum Beispiel auf Bildern in der Maltechnik des Pointilismus); ein enges Bündel wird als Einheit, nicht als mehrere Lichtquellen oder mehrere Tupfer wahrgenommen,
- rascher zeitlicher Wechsel farbiger Flächen (zum Beispiel beim Farbkreisel)
- gleichzeitige Beleuchtung einer diffus streuenden weißen Bildwand mit unterschiedlich farbigem Lichtquellen; sie ist ein Grenzfall enger Bündel unterschiedlich farbiger Punkte, weil jeder Punkt das Licht aller Quellen reflektiert.



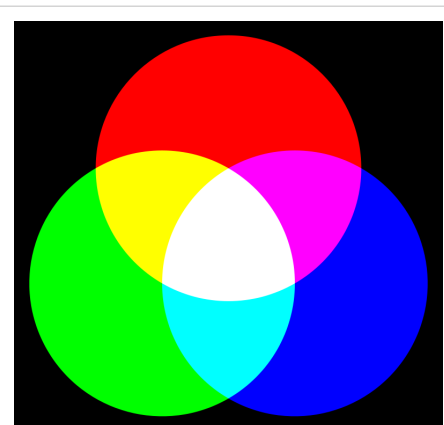
Additive Farbmischung am Röhrenmonitor

Werden spektrale Teilbereiche aus dem Licht der Quellen weggenommen (genauer: in ihrer Intensität verringert), spricht man von Subtraktiver Farbmischung (subtraktiv = wegnehmend). Die Subtraktive Farbmischung wird auch Physikalische Farbmischung genannt, weil sie im Gegensatz zur Additiven Farbmischung rein gegenständlich ist, nicht in Auge und Gehirn stattfindet.

Funktionsweise

Die additive Synthese wird durch die Dreifarbentheorie von Thomas Young und Hermann von Helmholtz beschrieben. Typisches Beispiel sind die Pixel bei Bildschirmen (Fernseher, Computer). Das Bild setzt sich aus vielen kleinen Flächenelementen zusammen. So werden die drei Basisfarben Rot (Orangerot), Grün, Blau (Violettblau) 'addiert'. Im ausreichenden Abstand bilden diese Flächenelementstrahler auf der Netzhaut einen „gemischten“ Farbreiz, sie bilden eine einheitlich wahrgenommene Farbnuance.

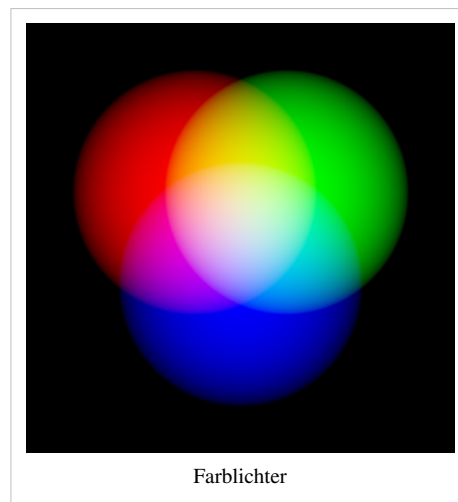
Drei Strahler (Scheinwerfer) beleuchten mit Lichtfarben in jeweils einer der drei Grundfarben R(ot), G(rün) und B(lau) eine weiße Fläche. Die Farbkegel mögen sich dabei teilweise überschneiden. Jedes



Additive Farbmischung

Projektionslicht erscheint in seiner reinen Farbe, solange es allein auf die Projektionsfläche trifft. Überschneiden sich zwei Lichtkegel, so entstehen Sekundärfarben, die bunten Grundfarben Gelb, Magenta (Magentarot) und Cyan (Cyanblau). In der Mitte überschneiden sich alle drei Lichtkegel - hier sieht man die Tertiärfarbe Weiß, den definitionsgemäß weißen Hintergrund. Die unbunte Grundfarbe Schwarz wird durch die Dunkelheit im Raum repräsentiert. Durch Intensitätsregelung der Lichtstrahler lässt sich im Überschneidungsbereich aller drei Grundfarben jede beliebige Farbnuance ermischen.

Cyanblau als Mischfarbe aus Grün und Violettblau ist die Komplementärfarbe von Orangerot. Wenn geeignetes Orangerot mit einer Brille in der Komplementärfarbe „Cyanblau“ betrachtet wird, nimmt man unbuntes Weiß wahr. Die beiden komplementären Farben addieren sich zu einem Spektrum mit (nahezu) gleicher Intensität über alle Wellenlängen. Diese vollständige Kombination der Farbvalenzen löst - bei genügender Intensität - die Wahrnehmung eines neutralen (unbunten) Weiß aus.



Additive Farbmischung

■ Rot	+	■ Grün		=	■ Gelb
		■ Grün	+	■ Blau	= ■ Cyan
■ Rot			+	■ Blau	= ■ Magenta
■ Rot	+	■ Grün	+	■ Blau	= Weiß

Umwandlung zwischen additiven und subtraktiven Farbwerten (zwischen RGB- und CMY-Modell)

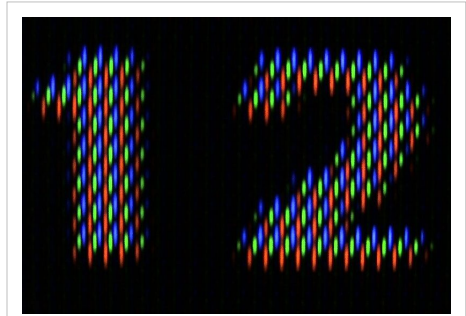
Von subtraktiv zu additiv (Werte in %)	Von additiv zu subtraktiv (Werte in %)
Rot = 100 - Cyan	Cyan = 100 - Rot
Grün = 100 - Magenta	Magenta = 100 - Grün
Blau = 100 - Gelb	Gelb = 100 - Blau

Einsatzgebiete

Die additive Farbmischung ist die Grundlage für die Farbwiedergabeverfahren die auf dem RGB-Farbraum beruhen. Anwendungen bestehen im besonderen bei Bildschirmen, wie beim Farbfernsehen. Auch die Digitalfotografie beruht auf dieser Form. Je nach dem farbwiedergebenden Verfahren kommen unterschiedliche Raster zum Einsatz, wie das Kornraster-, das Linienraster- oder das Linsenraster-Verfahren. Die technischen Probleme der Farbwiedergabe beruhen vor allem auf der Verfügbarkeit von wirtschaftlich, technologisch und technisch geeigneten Leuchtstoffen mit entsprechender Lumineszenz im erforderlichen Anregungsbereich.

Um die additive Farbwiedergabe in technischen Systemen möglichst natürlich anzubieten wurden bislang unterschiedliche dreidimensionale Farbmodelle aufgestellt. Einen neuen Weg in der technischen Umsetzung geht Sharp 2010 bei seinen LCD-Fernsehern. Durch Einsatz einer vierten Farbe bei den den Bildschirmen, also zu den bisherigen RGB-Pixeln, den roten, grünen, blauen Leuchtpunkten werden noch gelbe Subpixel (RGBY) für die Farbmischung eingebaut. Ziel ist die bessere Farbwiedergabe der bislang kritischen Gelb-, Gold und Brauntönen, auch die Wiedergabe der Hauttöne soll dadurch besser werden[3].

Im Gegensatz zur Mischung von „Farblichtern“ steht die Subtraktive Farbmischung für die Mischung von Körperfarben, wie die farbgebende Wirkung bei der analogen Fotografie und dem Vierfarbendruck erreicht wird.



Darstellung einer weißen „12“ auf schwarzem Hintergrund auf einem Röhrenfernseher. In der Nahaufnahme erkennt man die einzelnen Farben, aus denen die Ziffern zusammengesetzt sind.

Siehe auch

- Farblehre
- Farbige Schatten
- Alpha Blending
- Hexadezimale Farbdefinition
- Webfarbe

Literatur

- Harald Küppers: *Schnellkurs Farbenlehre*. DuMont Literatur und Kunst Verlag, Köln 2006.

Auge

Der Begriff **Auge** (lat. *Oculus*) bezeichnet die unterschiedlich aufgebauten Sinnesorgane vieler Lebewesen, die der Lichtwahrnehmung dienen. Sie verfügen über lichtempfindliche Nervenzellen (Fotorezeptoren), deren Erregungszustand durch elektromagnetische Strahlung unterschiedlicher Wellenlänge verändert wird. Diese Impulse werden über die Sehnervenbahnen an das Sehzentrum des Gehirns weitergeleitet, wo sie schließlich zu optischen Wahrnehmungen verarbeitet werden.

Der biologische Stellenwert und damit die Wahrnehmungsqualität der Augen ist eng an die Anforderungen und Umgebungen der jeweiligen Lebensformen angepasst. Auch die *Anzahl* der Augen sind ein evolutionäres Ergebnis der Lebensumstände. Manche Lebewesen, deren Orientierung weniger von visuellen Eindrücken bestimmt wird, benötigen lediglich eine grobe Unterscheidung von Hell und Dunkel, andere wiederum von Kontrast- und Bewegungsmustern. Höher entwickelte Augen dienen der kontrastreichen Bildwahrnehmung, deren Qualität mit der Fähigkeit steigt, Helligkeitsunterschiede sehr differenziert wahrzunehmen (*Minimum visibile*). Dies drückt sich wiederum in einer entsprechenden Sehschärfe (*Minimum separabile*) aus, die bei Tag, Dämmerung oder Nacht sehr unterschiedlich sein kann. Wieder andere benötigen weniger ein kontrastreiches Sehen als vielmehr ein großes Gesichtsfeld oder eine differenzierte Farbwahrnehmung in verschiedenen Wellenlängenbereichen.

Die Leistungsfähigkeit des Sehsinns und die Komplexität des anatomischen Aufbaus und der übergeordneten Bereiche zur Bilderzeugung und -verarbeitung steigt mit den Anforderungen der jeweiligen Lebensformen an die Qualität der visuellen Orientierung.



Auge eines Rotschwanzbussards (*Buteo jamaicensis*)



Augen einer Springspinne



Auge eines Graupapageien

Evolution des Auges

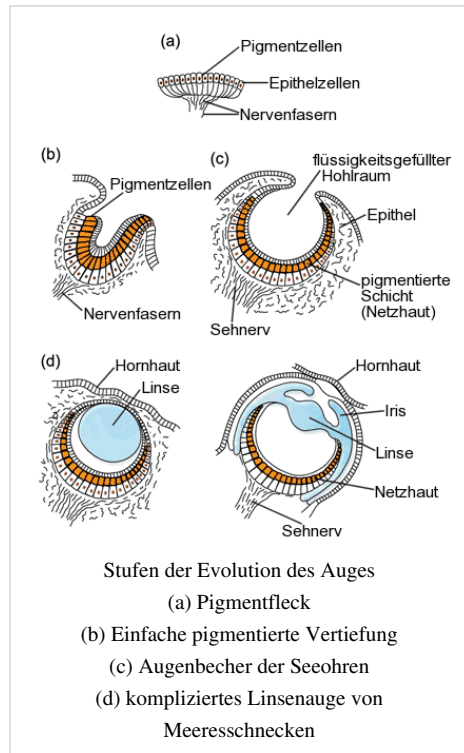
Es gab Schätzungen, dass Augen der verschiedensten Bauweisen im Laufe der Evolution etwa 40 Mal neu entwickelt worden seien. Dennoch spielt das Pax-6-Gen sowohl bei den Tintenfischen als auch bei Säugetieren (Mäuse) eine Rolle bei der Entwicklung der Augen. Bei der Fruchtfliege (*Drosophila melanogaster*) hat das hierzu homologe Gen „eyeless“ fast dieselbe Funktion. Deshalb liegt es nahe, dass all diese Augentypen einen gemeinsamen Ursprung haben. Orthologe von PAX-6 sind in vielen Chordatieren (Entwicklung vor etwa 540 Millionen Jahren) zu finden. Fossilfunde belegen auch, dass es die ersten Augen bereits vor 505 Millionen Jahren im Erdzeitalter Ordovizium (z. B. beim Nautilus) gab.

Bauformen

Die einfachsten „Augen“ sind lichtempfindliche Sinneszellen auf der Außenhaut, die als passive optische Systeme funktionieren. Sie können nur erkennen, ob die Umgebung hell oder dunkel ist. Man spricht hier von Hautlichtsinn.

Insekten und andere Gliederfüßer haben Augen, die aus vielen einzelnen Augen zusammengesetzt sind. Diese Facettenaugen liefern ein rasterartiges Bild (nicht mehrfache Bilder, wie man vermuten könnte).

Neben den beschriebenen Augentypen mit lichtbrechenden Linsen findet man in der Natur gelegentlich auch Spiegelaugen. In den Augen der Kammuschel (*Pecten*) wird das Bild durch Hohlspiegel erzeugt, die hinter der Netzhaut angeordnet sind. Die direkt vor der Netzhaut liegende Linse dient der optischen Korrektur des stark verzerrten Spiegelbildes. Die Spiegel sind nach dem Prinzip von reflektierenden Glasplatten gebaut. Mehr als 30 Schichten aus feinsten Guanin-Kristallen liegen dicht gestapelt, jede Schicht in eine Doppelmembran eingeschlossen. Auch andere Tiere haben Spiegelaugen, unter anderem der Tiefseekrebs *Gigantocypris*, der Hummer und die Langusten. Diese Form hat sich offenbar dort durchgesetzt, wo es weniger auf die Bildqualität und mehr auf die Lichtausbeute ankommt.



Photorezeptoren bei Einzellern

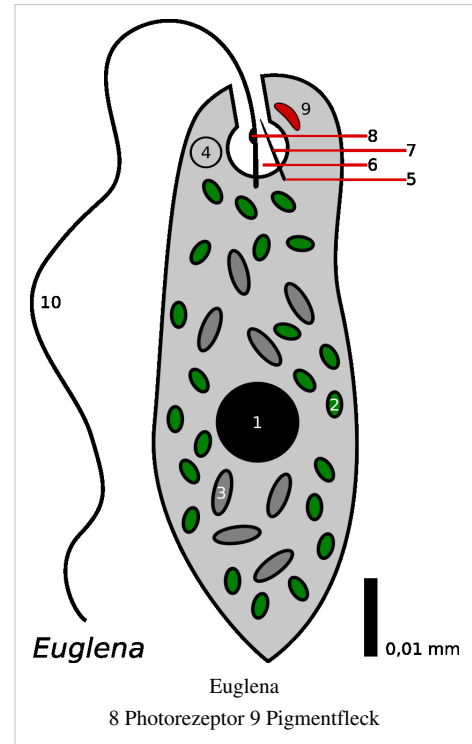
Bereits der Einzeller *Euglena* besitzt einen Fotorezeptor zur Hell-Dunkel-Wahrnehmung, welcher eine Verdickung an der Basis der Geißel bildet. Durch die Pigmente des Augenflecks wird er auf einer Seite abgeschirmt, so dass damit sogar ein einfaches Richtungssehen möglich ist. Das ermöglicht es der Zelle, sich zum Licht hin zu bewegen (Phototaxis)^[1].

Lichtsinneszellen

Höher entwickelte Lebewesen wie der Regenwurm besitzen am Körperende oder verstreut einzelne Lichtsinneszellen.

Flachaugen

Quallen und Seesterne besitzen viele nebeneinander liegende Lichtsinneszellen, die innen an eine Schicht aus Pigmentzellen anschließen können. Die Konzentrierung der Sinneszellen in solchen Flachaugen verbessert die Hell-Dunkel-Wahrnehmung.



Pigmentbecheraugen

In Pigmentbecheraugen liegen die Sehzellen vom Licht abgewandt (inverse Lage) in einem Becher aus lichtundurchlässigen Pigmentzellen. Das Licht kann nur durch die Öffnung des Bechers eindringen, um die Sehzellen zu stimulieren. Da daher immer nur ein kleiner Teil der Sehzellen gereizt wird, kann neben der Helligkeit auch die Einfallsrichtung des Lichts bestimmt werden. Solche Augen besitzen unter anderem Strudelwürmer und Schnecken^[2].

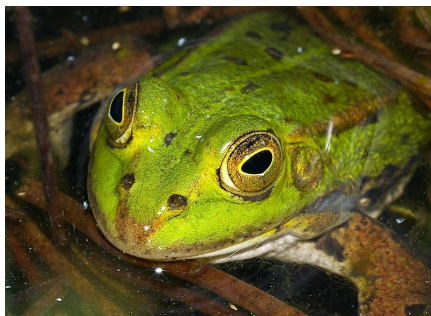
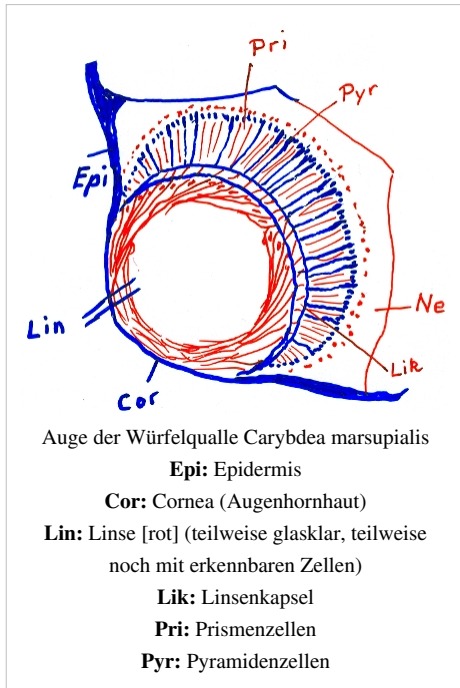
Grubenaugen

Das Grubenaugen unterscheidet sich vom Pigmentbecherauge durch die dem Licht zugewandte (evertse) Lage der Sinneszellen und dadurch, dass die Grube mit Sekret gefüllt ist. In der Grube bilden die Sehzellen eine Zellschicht, die innen an eine Schicht von Pigmentzellen anschließt. Es ist also eine Weiterentwicklung des Flachauges. Es ermöglicht auch die Bestimmung der Intensität und der Einfallsrichtung des Lichts.

Lochaugen

Lochaugen sind verbesserte Grubenaugen. Die Öffnung der Grube ist nur noch ein kleines Loch und der Hohlraum ist vollständig mit Sekret gefüllt. Durch die erhöhte Anzahl der Sehzellen ist nun auch Bildsehen möglich. Das Bild ist jedoch lichtschwach und nur schemenhaft. Diesen Typ findet man bei niederen Tintenfischen. Eine Abart des Lochauges ist das Blasenaugen, bei dem die Öffnung von einer durchsichtigen Haut bedeckt ist (Vorkommen bei manchen Schneckenarten). Das Sekret kann auch zu einer einfachen Art von Linse verfestigt sein (bei Weinbergschnecken der Fall). Diese Modifikationen verbessern das Bild geringfügig.

Linsenauge



Froschaugen

Das einfachste Linsenauge hat noch nicht den komplizierten Aufbau, den wir vom Wirbeltierauge kennen. Es besteht aus nicht viel mehr als Linse, Pigmentzellen und Retina. Ein Beispiel hierfür ist das Linsenaug der Würfelqualle *Carybdea marsupialis*. Zudem schauen die Augen an den vier Sinneskörpern am Schirmrand der Qualle in den Schirm hinein. Dennoch kann sie damit gut genug sehen, um Rudern auszuweichen, an denen sie sich verletzen könnte.^[3]

Auch manche Ocellen der Gliederfüßer sind einfache Linsenaugen.

Obwohl sich die Augen von Wirbeltieren und Tintenfischen im Aufbau stark ähneln, haben sie diese sehr ähnliche Funktionsweise unabhängig voneinander entwickelt. Dies wird bei der Bildung des Auges beim Embryo sichtbar: Während sich das Auge bei Wirbeltieren durch eine Ausstülpung der Zellen entwickelt, die später das Gehirn bilden, entsteht das Auge der Weichtiere durch eine Einstülpung der äußeren Zellschicht, die später die Haut bildet.

Ein Krötenauge besitzt schon die meisten Teile, die auch das menschliche Auge hat, nur die Augenmuskeln fehlen. Deshalb kann eine Kröte, wenn sie selber ruhig sitzt, keine ruhenden Gegenstände sehen, da sie nicht zu aktiven Augenbewegungen fähig ist und das Bild auf der Netzhaut dadurch verblasst, wenn es unbewegt ist.^[4]

Bei den höchstentwickelten Linsenaugen sammelt ein mehrstufiger lichtbrechender Apparat das Licht und wirft es auf die Netzhaut, die nun zwei Arten von Sinneszellen enthält, Stäbchen und Zapfen. Die Einstellung auf Nah- und Fernsicht wird durch eine elastische Linse ermöglicht, die von Zonulafasern gestreckt bzw. gestaucht wird. Die besten Linsenaugen findet man bei Wirbeltieren.

So ist zum Beispiel bei Greifvögeln die Fähigkeit entwickelt, Objekte in einem Bereich der Netzhaut stark vergrößert zu sehen, was insbesondere beim Kreisen in großer Höhe beim Lauern auf Beute vorteilhaft ist.

Nachttiere wie Katzen, Eulen und Rehe, aber auch Schafe realisieren durch eine retroreflektierende Schicht (meist grün oder blau) hinter der Netzhaut einen Zugewinn an Empfindlichkeit, was ihnen als Nachttiere (Räuber wie Beute) zugute kommt. Siehe hierzu: Tapetum lucidum.

Bei Katzen findet man zusätzlich eine sogenannte Schlitzblende, die beim Öffnungsverhältnis größere Unterschiede als Lochblenden erlaubt. Beim Tagsehen werden aber bei Schlitzblenden periphere Strahlbündel weniger als bei Lochblenden unterdrückt, so dass die Sehschärfe beim Tagsehen weniger optimal ist.

Im Verhältnis zur Körpergröße sind die Augen bei nachtaktiven Tieren deutlich größer als bei den tagaktiven.

Für die Leistungsfähigkeit eines Auges ist neben der Form des Auges und der Zahl und Art der Stäbchen und Zapfen auch die Auswertung der Wahrnehmungen durch die Nervenzellen im Auge und im Gehirn sowie die Augenbewegungen und die Lage der Augen am Kopf sehr wesentlich.

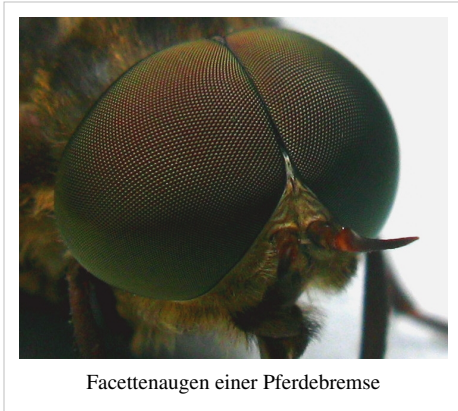


Katzenauge mit Schlitzpupille

Die Auswertung im Gehirn kann von Art zu Art sehr variieren. So hat der Mensch sehr viel mehr unterschiedliche Bereiche zur Bildauswertung und zum Bild erkennen im Gehirn als ein Spitzhörnchen.

Facettenaugen (Komplexaugen)

Facettenaugen setzen sich aus einer Vielzahl von Einzelaugen (Ommatidien) zusammen, von denen jedes acht Sinneszellen enthält. Jedes Einzelauge sieht nur einen winzigen Ausschnitt der Umgebung, das Gesamtbild ist ein Mosaik aus allen Einzelbildern. Die Anzahl der Einzelaugen kann zwischen einigen Hundert bis hin zu einigen Zehntausend liegen.^[5] Die Auflösung des Facettenauges ist durch die Anzahl der Einzelaugen begrenzt und ist daher weit geringer als die Auflösung des Linsenauges. Allerdings kann die zeitliche Auflösung bei Facettenaugen deutlich höher sein als bei Linsenaugen. Sie liegt etwa bei fliegenden Insekten bei 250 Bildern pro Sekunde (also 250 Hz), was etwa dem vierfachen des menschlichen Auges mit 60 bis 65 Hz^[6] entspricht. Dies verleiht ihnen eine extrem hohe Reaktionsgeschwindigkeit. Die Farbempfindlichkeit des Facettenauges ist in den ultravioletten Bereich verschoben. Außerdem verfügen Spezies mit Facettenaugen über das größte Blickfeld aller bekannten Lebewesen. Zu finden sind diese Augen bei Krebsen und Insekten.



Facettenaugen einer Pferdebremse

Zusätzlich besitzen viele Gliederfüßer Ocellen, kleinere Augen, die sich häufig auf der Stirnmitte befinden und sehr unterschiedlich aufgebaut sein können. Bei einfachen Ocellen handelt es sich um Grubenaugen. Besonders leistungsfähige Ocellen besitzen eine Linse oder, wie bei den Spinnentieren, auch einen Glaskörper, es handelt sich also um kleine Linsenaugen.

Zentrale Eigenschaften

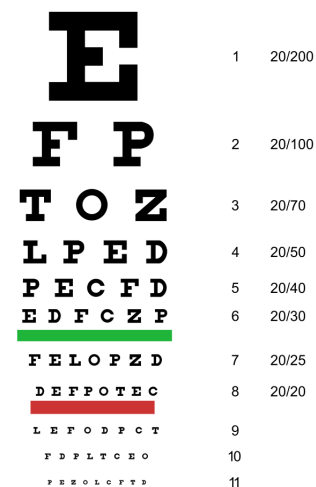
Als Resultat einer visuellen Reizverarbeitung sind die Eigenschaften *Sehschärfe*, *Gesichtsfeld* und *Farbsehen* zu nennen. Die Anforderungen der jeweiligen Lebensformen an diese Fähigkeiten sind sehr unterschiedlich ausgeprägt.

Sehschärfe

→ *Hauptartikel*: Sehschärfe

Mit *Sehschärfe* wird die Fähigkeit eines Lebewesens bezeichnet, Konturen und Muster in der Außenwelt als solche zu erkennen. Ihre Qualität ist abhängig von

- dem Auflösungsvermögen des Augapfels
- der Abbildungsqualität auf der Netzhaut, die durch die brechenden Medien des Auges – Hornhaut, Kammerwasser, Linse und Glaskörper – bestimmt wird
- den optischen Eigenschaften des Objekts und seiner Umgebung (Kontrast, Farbe, Helligkeit)
- der Form des Objekts: die Netzhaut und das zentrale Nervensystem sind in der Lage, bestimmte Formen (horizontale und vertikale Geraden, rechte Winkel) höher aufzulösen als es dem Auflösungsvermögen des Augapfels allein entspricht.



Sehprobentafel zur Ermittlung der Sehschärfe beim Menschen

Zur Quantifizierung hat man verschiedene Parameter definiert. Die Winkel-Sehschärfe (angulare Sehschärfe) ist das Auflösungsvermögen, bei dem zwei Sehobjekte noch als getrennt wahrgenommen werden (Minimum separabile). Die Auflösung von 1' (einer Bogenminute) entspricht einer Ortsauflösung von etwa 1,5 mm bei 5 m Abstand. Je kleiner die Winkel-Sehschärfe ist, desto besser ist die Sehschärfe. Die dimensionslose Eigenschaft Visus wird definiert, indem die Bezugsgröße 1' in Beziehung zur individuellen Winkel-Sehschärfe gesetzt wird.

$\text{Visus} = 1' / (\text{individuelle Winkel-Sehschärfe})$

Je größer der Visus ist, desto besser ist die Sehschärfe. Beispiel: wenn eine Person Punkte erst bei einem Winkelabstand von 2' trennen kann, hat sie einen Visus von 0,5. Statt Winkel können auch Entfernungen bestimmt werden. Wenn man als Bezugsgröße den Abstand d wählt, bei dem man zwei Punkte unter einem Winkel von 1' sieht, dann ist:

$\text{Visus} = \text{individueller Abstand} / d$

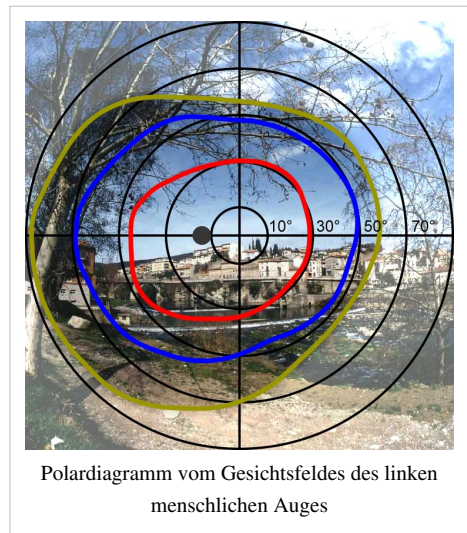
Beispiel: wenn eine Person erst im Abstand von 6 m die Punkte getrennt sehen kann, die bei 12 m einen Winkelabstand von 1' haben, hat sie einen Visus von $6/12 = 0,5$ ^[7].

Gesichtsfeld

→ Hauptartikel: Gesichtsfeld

Mit *Gesichtsfeld* bezeichnet man alle zentralen und peripheren Punkte des Außenraums, die bei ruhiger, gerader Kopfhaltung und geradeaus gerichtetem, bewegungslosem Blick visuell wahrgenommen werden können, und die durch variierende Grösse und Leuchtdichte unterschiedliche Anforderungen an die Qualität der visuellen Wahrnehmung stellen. Man unterscheidet das monokulare Gesichtsfeld jeweils eines Auges von der Summe der Gesichtsfelder aller Augen eines Lebewesens. Seine Grösse wird in der Regel in der Einheit *Grad* angegeben und unterscheidet sich je nach Lebewesen teils sehr deutlich. Beispiele der Dimension eines horizontalen Gesichtsfeldes:

- Fliegen fast 360° (Facettenaugen)
- Frosch ca. 330°
- Turmfalke 300°
- Krokodil 290°
- Mensch 175°
- Schleiereule 160°
- Schnecken (Napf- und Lochaugen) etwa 100° bis 200°
- Quallen und Würmer (Flachaugen) 100° bis 180°, bei mehreren Augen größer^{[8] [9]}.



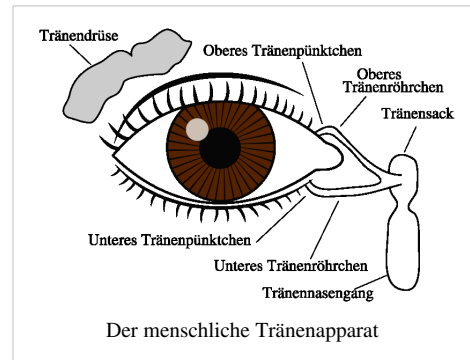
Farbsehen

→ Hauptartikel: Farbwahrnehmung

Die *Farbwahrnehmung* ist die Fähigkeit, elektromagnetische Wellen verschiedener Wellenlängen in ihrer Intensität zu unterscheiden. Diese Fähigkeit ist im ganzen Tierreich verbreitet. Das Absorptionsspektrum der wahrgenommenen und unterscheidbaren Wellenlängen charakterisiert artspezifisch die Qualität dieser Fähigkeit. Dazu muss das Wahrnehmungssystem mindestens zwei unterschiedliche Typen von *Lichtrezeptoren* besitzen, um die Zusammensetzungen des Lichts erkennen zu können.

Auge der Säugetiere

Die Augen der Säugetiere sind sehr empfindliche Sinnesorgane. Umgeben von Nasen-, Joch-, Tränen- und Stirnbein liegen sie geschützt, eingebettet in einem Fett- und Bindegewebsspolster, in den knöchernen Augenhöhlen (Orbita) des Schädels. Der Schutzmechanismus des Lidschlussreflexes soll verhindern, dass das Auge durch äußere Einwirkungen geschädigt wird. Durch das schnelle Schließen des Augenlids schützt er zum Einen vor Fremdkörpern, zum Anderen bewahrt er die empfindliche Hornhaut durch ständiges Benetzen mit Tränenflüssigkeit vor dem Austrocknen. Auch die Wimpern dienen dem Schutz vor Fremdkörpern, Staub und kleineren Partikeln.



Das Sehorgan (*Organon visus*) der Säugetiere kann in drei Untereinheiten gegliedert werden:

1. den Augapfel, *Bulbus oculi* (lat.) oder *Ophthalmos* (griech.),
2. die Anhangsorgane des Auges (Tränenapparat, Augenmuskeln und passiver Halte- und Bandapparat, Bindehaut und Augenlider) und
3. die Sehbahn^[9].

Augapfel

Der Augapfel (Synonym: *Bulbus oculi*) ist ein fast kugelförmiger Körper, der sich innerhalb bestimmter Grenzen wie in einer kardanischen Aufhängung um beliebig viele Achsen drehen kann, dabei seine Position innerhalb der Augenhöhle jedoch nicht, beziehungsweise nur unwesentlich verändert.^[7] Seine Hülle besteht aus drei konzentrischen Schichten:

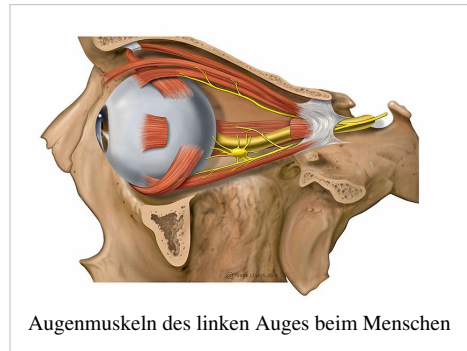
- Die äußere Augenhaut (*Tunica externa bulbi*, auch *Tunica fibrosa bulbi*). Sie wird in zwei Abschnitte untergliedert. Dort, wo das Licht ins Auge eintritt, befindet sich die durchsichtige Hornhaut (Cornea). Sie wird ständig mit Tränenflüssigkeit befeuchtet. Sie geht unmittelbar in die weiße Lederhaut (*Sclera*) über, die den größeren restlichen Teil der äußeren Augapfelhülle bildet. An ihr setzen die äußeren Augenmuskeln an, die das Auge in der Augenhöhle bewegen. Im vorderen Augenabschnitt ist sie von Bindehaut bedeckt, sodass nur die Cornea von Tränenflüssigkeit direkt benetzt wird.
- Die mittlere Augenhaut (*Tunica media bulbi* oder *Uvea*). Sie besteht aus drei Abschnitten. Die Aderhaut ist reich an Blutgefäßen und versorgt die anliegenden Schichten mit Nährstoffen und Sauerstoff und ist häufig pigmentiert. Nach vorn geht die Aderhaut in den Ziliarkörper (auch Strahlenkörper, *Corpus ciliare*) über, der der Aufhängung der Augenlinse und deren Akkommodation dient. Der vorderste Abschnitt der mittleren Augenhaut ist die Regenbogenhaut (*Iris*). Sie bildet die Pupille und reguliert den Lichteinfall (Adaptation). Ihre Pigmentierung verursacht die Augenfarbe.
- Die innere Augenhaut (Netzhaut, *Tunica interna bulbi* oder *Retina*). Sie enthält die Lichtsinneszellen (Photorezeptoren). Dort, wo der Sehnerv das Auge verlässt (Sehnervenpapille), befinden sich keine Lichtsinneszellen. Den zu dieser Stelle korrespondierenden Bereich des Gesichtsfelds nennt man den Blinden Fleck. Die Stelle des schärfsten Sehens ist die Fovea centralis, die sich innerhalb des gelben Flecks (Macula lutea) befindet. Zur inneren Augenhaut gehört auch eine Pigmentschicht, das Pigmentepithel.

Der Innenraum des Augapfels enthält den Glaskörper (*Corpus vitreum*), sowie die Linse (*Lens*) und wird unterteilt in vordere und hintere Augenkammer (*Camera anterior* und *posterior bulbi*)^[9].

Augenbewegung

→ *Hauptartikel*: Augenbewegung

Der *Bewegungsapparat* der Augen ist bei Säugetieren sehr komplex und besteht neben jeweils sechs äußeren Augenmuskeln aus elastischem Bindegewebe, sowie einem passiven Halteapparat von Bändern und Sehnen (siehe auch: Tenonsche Kapsel, Lockwood-Ligament). Diese sorgen zum Einen für koordinierte Bewegungsmuster beider Augen, zum Anderen für eine sichere Lagerung innerhalb der Augenhöhle. Augenbewegungen, die jeweils lediglich ein Auge durchführt, werden *Duktionen* genannt. Gleichsinnige Bewegungen beider Augen, beispielsweise nach rechts oder links, nennt man *Versionen*, gegensinnige Augenbewegungen *Vergenzen*^[7].

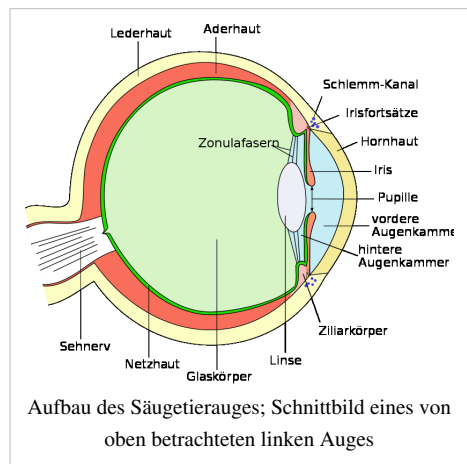


Augenmuskeln des linken Auges beim Menschen

Die Augenbewegungen erfolgen einerseits mit dem Ziel, die Gesichtslinien auf ein zu fixierendes Objekt im Aussenraum auszurichten - dies möglichst exakt und in kürzester Zeit. Dabei repräsentiert die *Fovea centralis* bei Lebewesen mit zentraler Fixation neben der *Hauptsehrichtung* auch den *motorischen Nullpunkt* des Auges hinsichtlich seiner Bewegungsphysiologie und ermöglicht so eine *subjektive Lokalisation* im Raum. Andererseits vergrößern die Augenbewegungen das Blickfeld. Dabei ist die monokulare Exkursionsstrecke von Bedeutung, also die maximale Bewegungsfähigkeit des jeweils rechten und linken Auges, die von Lebewesen zu Lebewesen sehr unterschiedlich ausgeprägt sein kann. Die Leistungsfähigkeit der Augenmuskeln ist in der Regel um ein Vielfaches höher, als tatsächlich täglich benötigt wird^[7].

Funktionsmechanismus der Bilderzeugung

Ins Innere gelangt das Licht durch die Hornhaut und die Pupille. Sie ist die kreisförmige Öffnung der farbigen Regenbogenhaut, der Iris. Durch die Muskelfasern in der Iris kann die Pupille vergrößert und verkleinert werden. Dieser Vorgang, der das Auge an die Helligkeit der Umgebung anpasst, heißt *Adaptation*. Hinter der Iris ist die elastische Augenlinse an Bändern aufgehängt. Die Linsenbänder verlaufen zum ringförmigen Ziliarmuskel. Das Augeninnere ist von dem gallertartigen Glaskörper erfüllt. Er verleiht dem Auge die feste und runde Form, die auch *Augapfel* genannt wird.



Aufbau des Säugetierauges; Schnittbild eines von oben betrachteten linken Auges

Der durch das Auge wahrnehmbare Bereich (Lichtspektrum) des elektromagnetischen Spektrums ist von Lebewesen zu Lebewesen unterschiedlich. Die Bienen sehen beispielsweise kurzwelligeres Licht, das sogenannte ultraviolette UV-Licht, während sie andererseits kein rotes Licht wahrnehmen können. Der Sehraum im Auge der Säugetiere ist für farbiges Sehen (farbiges Licht, durch die Zapfen) sehr viel kleiner als der für Hell und Dunkel (weißes Licht, durch die Stäbchen). Somit liegt der Farbsehraum auch innerhalb des Weißlichtsehraumes.

Zwar ist der größte Teil der Netzhaut (*Pars optica retinae*) mit Sinneszellen bedeckt, das Scharfsehen entsteht jedoch nur innerhalb bestimmter Grenzen, dem sogenannten Gelben Fleck (*Macula lutea*). Es wird also prinzipiell nur der Bereich scharf gesehen, den die Augen mit ihren Gesichtslinien fixieren.

Beim Betrachten eines Gegenstandes kommt ein konstantes und scharfes Bild erst dadurch zustande, dass uns die Augenmuskeln, meist unbewusst, nacheinander verschiedene Ausschnitte des Objektes auf einer Fläche von etwa 1,0° vor die Fovea centralis, das Zentrum des Gelben Flecks, rücken^[7]. Das Auge ruht also beim Betrachten nie und ist immer in kleinsten Bewegungen begriffen, indem ein Punkt für Sekundenbruchteile fixiert wird, um dann eine

kleinste, ruckartige Bewegung (Mikrosakkade) zu einem nächsten Punkt folgen zu lassen. Aus diesem "Abtasten" wird schließlich das Gesamtbild generiert. Bei ruhiger Betrachtung dauern die einzelnen Fixationen 0,2 bis 0,6 Sekunden, so dass in einer Sekunde 2 bis 5 Sakkaden stattfinden. Bei schnellerem Blicken werden die Sakkaden häufiger und die Fixationszeiten kürzer.

Die Wahl der Fixationspunkte und das Muster der Sakkaden ist in hohem Maße individuell und steht im Zusammenhang mit den Gewohnheiten und dem Interesse des Betrachters oder der Aufgabenstellung an ihn. Man spricht heute vom Intentionalen Sehen, einem aktiven Vorgang zur Welt hin. Durch entsprechende Beobachtungsmethoden macht sich mittlerweile vor allem die Werbebranche, aber auch die Verhaltensforschung dieses Phänomen der unwillkürlichen Aktivität zu Nutze um damit ihre Werbemethoden bzw. ihre Thesen zum menschlichen Verhalten zu verbessern und zu optimieren. Auch im Zusammenhang mit der Entwicklung von Lügendetektoren sind immer wieder entsprechende Instrumente im Einsatz, meist zur Bewertung des Erregungszustands.

Eigenarten des menschlichen Auges

Für den Menschen ist der Sehsinn von sehr großer Bedeutung. Er ist der *Leitsinn*, der Menschen und anderen visuell ausgerichteten Lebewesen eine sichere Orientierung ermöglicht. Ganz praktisch drückt sich dies auch in den Entschädigungssummen aus, die für den Verlust eines oder beider Augen von Versicherungen gezahlt werden. Hierbei wird der Invaliditätsgrad bei Verlust eines Auges mit 50% angegeben^[10].

Der adäquate Reiz für das Sinnesorgan *Auge* entsteht beim Menschen durch elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge zwischen etwa 400 und 760 Nanometer und ist für Tag- und Nachtsehen etwas unterschiedlich (siehe Empfindlichkeitskurve). Der anatomische und funktionelle Aufbau des Augapfels stellt sicher, dass die zentrale Eigenschaft des menschlichen Sehens, die Sehschärfe, eine entsprechend hohe Qualität erreicht. Sie entsteht auf nur 0,02 Prozent der Netzhautfläche, was etwa 5° unseres insgesamt horizontal rund 170° und vertikal rund 110° umfassenden binokularen Gesichtsfeldes entspricht^[9].



Bei der Geburt besitzt das Auge noch nicht seine volle Sehfähigkeit. Erst im Lauf der ersten Lebensmonate lernt es, die Dinge im Umfeld zu fixieren und somit für die notwendige Stimulanz zu sorgen, die das visuelle System für eine adäquate Entwicklung der Sehschärfe benötigt. Die Augen weisen im frühkindlichen Stadium in der Regel eine physiologische Weitsichtigkeit von +2,0 bis +3,0 Dioptrien auf. Durch das anatomische Wachstum ändern sich auch die optischen Verhältnisse. Die Weitsichtigkeit reduziert sich bis zum Erwachsenenalter deshalb im Idealfall auf etwa +0,5 Dioptrien.

Das menschliche Auge gehört zur Gruppe der Linsenaugen. Das zur Lichtbrechung notwendige optische System besitzt eine Gesamtbrechkraft von rund 60,00 Dioptrien (Emmetropage nach Gullstrand 58,635 dpt)^[9]. Die jeweiligen optisch wirksamen Bestandteile Hornhaut, Linse, Kammerwasser und Glaskörper, die sogenannten *brechenden Medien*, haben daran unterschiedlich große Anteile. Das gesamte System stellt sicher, dass die in das Auge einfallenden Lichtstrahlen auf der Stelle des schärfsten Sehens, der Fovea centralis, gebündelt werden. Durch die Fähigkeit der Akkommodation ist dies in den unterschiedlichsten Distanzen zwischen optischem Fern- und Nahpunkt möglich.

Auch wenn es den Anschein hat, als würde das menschliche Auge Dinge im Aussenraum ruhig und bewegungslos fixieren, so vollführt es gleichwohl pro Sekunde permanent etwa 1-3 sehr kleine Blicksprünge, sogenannte Mikrosakkaden. Dies beugt einer Überreizung der Sinneszellen auf der Netzhaut vor, die *Lokaladaption* genannt wird^[7].

Die Augenfarbe entsteht durch unterschiedliche Pigmentierung der Regenbogenhaut (Iris). Durch Einlagerung des braunfärbenden Melanins in die Iriseigenschicht bildet sich eine charakteristische Augenfarbe, die in Abhängigkeit von der Pigmentmenge über grau, gelb, grün bis braun, bei entsprechend hoher Menge von Melanin sogar bis hin zu schwarz, reicht. Dieses korreliert beim Menschen meist mit der Haut- und Haarfarbe. So besitzen hellhäutige und blonde Menschen eher blaue Augen, während dunkelhäutige mit dunklen Haaren meist eine braune Irisfärbung aufweisen.^{[11] [12]} Etwa 90 Prozent aller Menschen weltweit haben braune Augen, darunter der weitaus überwiegende Teil der Menschen nicht europäischer Abstammung. Der Rest verteilt sich auf Blau, Grün und Grau. Der Theorie des Genforschers Hans Eiberg von der Universität Kopenhagen zu Folge sollen alle Blauäugigen von ein und demselben Menschen abstammen^[13].

Während bei vielen anderen Lebewesen die *Beidäugigkeit* ausschließlich der Vergrößerung des Gesichts- und Blickfeldes dient, ist der menschliche Sehsinn darüber hinaus eindeutig auf Binokularität ausgelegt, das heißt auf einer *Verschmelzung* der Seheindrücke des jeweils rechten und linken Auges. Erst diese Fähigkeit als Ergebnis einer exakten Koordination und Zusammenarbeit ermöglicht ein qualitativ hochwertiges räumliches Sehen^[7].

Menschliches Auge in Zahlen

Alle Werte sind Durchschnittswerte und können nach Geschlecht und Alter variieren^{[7] [9] [14] [15]}.

Erkrankungen und Funktionsstörungen

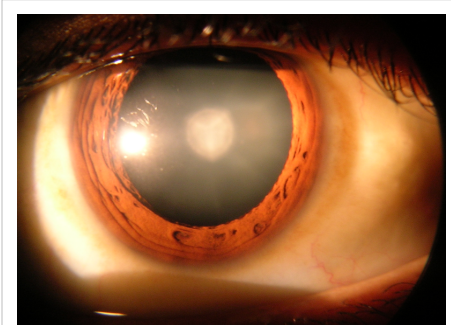
→ siehe auch: Krankheitsbilder in der Augenheilkunde Krankheitsbild in der Augenheilkunde

Die Augenheilkunde beschäftigt sich mit der Diagnostik und Therapie von Augenkrankheiten. Diese führen in erster Linie zu einem mehr oder weniger ausgeprägten Verlust an funktioneller Leistungsfähigkeit, wie beispielsweise einer Verminderung der Sehschärfe, Einschränkungen des Gesichtsfeldes, Farbsinnstörungen, Reduzierung des Dämmerungssehens oder Störungen des beidäugigen Sehens. Zudem gehören virale und bakterielle Infektionen, sowie lokale Entzündungsprozesse, Schmerzen, Schwellungen, Tumorbildung, vermehrter Tränenfluß, erhöhte Blendungsempfindlichkeit und Bewegungsstörungen zu den weiteren möglichen Symptomkomplexen und organischen Beeinträchtigungen.



Bindehautentzündung (Konjunktivitis)

Zu den häufigsten Erkrankungen mit einer Sehschärfenminderung^[16] gehören neben dem *Grauen Star* (Katarakt) und dem *Grünen Star* (Glaukom) die altersbedingte Makuladegeneration und die Diabetische Retinopathie. Für die häufigsten Formen der Katarakt, des Glaukoms und der Makuladegeneration vermutet man als Ursache Altersveränderungen auf der Grundlage genetischer Veranlagungen. Vor allem für die Makuladegeneration stellt daneben das Rauchen den wesentlichen exogenen Risikofaktor dar. Man vermutet für die Katarakt und die Makuladegeneration außerdem einen schädlichen Einfluss von ultraviolett Licht. Die diabetische Retinopathie ist Folge von Gefäßveränderungen, die durch den erhöhten Blutzuckerspiegel hervorgerufen werden. Auch sie tritt bei Rauchern früher und häufiger auf als bei Nichtrauchern.



Grauer Star (Katarakt)

Die Heilungsaussichten mit den zur Verfügung stehenden konservativen und operativen Behandlungsmöglichkeiten sind dabei sehr unterschiedlich. Erkrankungen mit Beteiligung der Netzhaut haben häufig eine ungünstigere Prognose, weil diese weder regenerationsfähig noch bislang dauerhaft ersetzbar ist. Hier kann es zu Ablösungen (Amotio), Löchern (Foramen), Rissen (Ruptur) oder Spaltungen von Netzhautschichten (Retinoschisis) kommen. Bei manchen Netzhauterkrankungen (z. B. Retinopathia pigmentosa) hofft man, in der Zukunft eine Wiederherstellung

der Sehfunktion durch ein Retina-Implantat zu erreichen^[17].

Des Weiteren finden sich häufig Entzündungsprozesse, besonders an der Bindehaut (Konjunktivitis), der Hornhaut (Keratitis), der Regenbogenhaut (Iritis) und der Aderhaut (Uveitis), aber auch am Tränenapparat und den Lidern (Blepharitis). Innerhalb des Glaskörpers kann es zudem zu krankhaften Eintrübungen kommen.

Eine funktionale Erkrankung des Auges ohne erkennbare organische Ursache in Form einer teils massiven Verminderung der Sehschärfe nennt man Amblyopie. Sie wird unter anderem durch bestimmte Schielerkrankungen oder sehr unterschiedliche Brechungsverhältnisse (Anisometropie) hervorgerufen^[7].

Verminderungen der Abbildungsqualität auf der Netzhaut und somit der Sehschärfe können durch refraktiv bedingte Fehlsichtigkeiten (Ametropie) wie Kurzsichtigkeit, Weitsichtigkeit oder Hornhautverkrümmung verursacht werden. Altersbedingt verliert zudem die Linse an Elastizität, was eine Reduzierung der Naheinstellungsfähigkeit zur Folge hat und zur Presbyopie führt^[9].

Es gibt eine ganze Reihe von Erkrankungen, die ihre Ursachen an ganz anderer Stelle haben, sich gleichwohl mit entsprechenden Symptomen am oder im Auge manifestieren. Dazu gehören insbesondere bestimmte neurologische Krankheitsbilder, die endokrine Orbitopathie als Ausdruck eines hormonell bedingten Autoimmunprozesses, Diabetes mellitus, Durchblutungs- und Stoffwechselstörungen, Toxoplasmose oder die Multiple Sklerose. Aus diesem Grund spielt die ophthalmologische Diagnostik bei der Identifizierung fachübergreifender Krankheitsbilder eine wichtige Rolle.

Das Auge ist häufig äußeren Einwirkungen ausgesetzt, die zu Verletzungen führen können, beispielsweise durch Fremdkörper, stumpfe Kontusion (Faustschlag, Tennisball etc.) oder Verblitzungen.

Unspezifische Beeinträchtigungen des Sehens werden auch unter dem Begriff Sehstörung zusammengefasst.

Untersuchungsverfahren

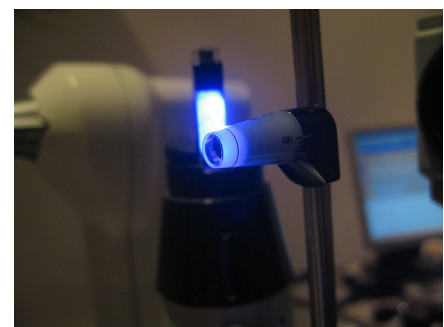
→ siehe auch: Diagnosverfahren in der Augenheilkunde Diagnostisches Verfahren in der Augenheilkunde

Die ophthalmologische Diagnostik ist geprägt von einer Vielzahl von apparativen Untersuchungsverfahren und erstreckt sich bei der organischen Beurteilung in erster Linie auf die Inspektion der sichtbaren Bestandteile der vorderen, mittleren und hinteren Augenabschnitte. Dabei kommen spezielle Geräte zum Einsatz, mit denen annähernd sämtliche Organbereiche eingesehen und beurteilt werden können. Eines der Wichtigsten ist hierbei die Spaltlampe, die, teils in Kombination mit weiteren Hilfsmitteln wie bspw. dem Kontaktglas, eine Begutachtung aller wesentlicher Abschnitte ermöglicht. In Verbindung mit einem Applanationstonometer lässt sich zudem auch der Augeninnendruck messen. Kompaktere Varianten, insbesondere zur Beurteilung des Augenhintergrunds, finden sich in den sogenannten Ophthalmoskopen. Untersuchungen des Augenhintergrunds werden häufig mit Pupillen erweiternden Medikamenten vorbereitet, um einen besseren Einblick zu ermöglichen.

Die Messungen und Untersuchungen der Funktionalität des Sehsinns erfolgen ebenfalls mit einer Vielzahl von Hilfsmitteln und Apparaturen. Zur Prüfung der Sehschärfe (Sehtest) und der optischen Verhältnisse der Augen benutzt man beispielsweise Phoropter und



Untersuchung an der Spaltlampe



Applanationstonometer an einer Spaltlampe

Refraktometer. Das Gesichtsfeld wird mittels eines Perimeters gemessen, Dämmerungssehen und Blendungsempfindlichkeit ermittelt ein Nyktometer, und der Farbsinn wird unter anderem mit den sogenannten Ishihara-Farbtafeln geprüft. Die Untersuchung des beidäugigen Sehens und die Beweglichkeit beider Augen hat sogar ein eigenständiges Spezialgebiet hervorgebracht. Für alle Funktionen des menschlichen Sehsinns gibt es Prüf- und Testverfahren, die reproduzierbare Ergebnisse liefern und so eine detaillierte Verlaufsdokumentation ermöglichen.

Metaphern und Redewendungen

Der Begriff "Auge" wird häufig in Redewendungen und Metaphern verwendet. Einige Beispiele:

- Die Augen niederschlagen
- Wachsame Augen
- Jemandem etwas auf's Auge drücken
- Auge um Auge, Zahn um Zahn
- Aus den Augen verlieren
- Gespräch unter vier Augen
- Ein kurzer Augenblick
- Jemandem schöne Augen machen
- Etwas in Augenschein nehmen
- Etwas/Jemand ist eine Augenweide
- Ein Dorn im Auge sein
- Jemandem die Augen öffnen
- Mit einem blauen Auge davonkommen
- Mit einem lachenden und einem weinenden Auge
- Ein Auge riskieren
- Etwas/Jemanden mit anderen Augen betrachten
- Augen zu und durch

Nota bene

- In der Jägersprache werden die Augen des Schalenwildes als *Lichter* bezeichnet.
- In der Psychologie spricht man im Zusammenhang mit den Augen vom *Spiegel der Seele*.
- In der Meteorologie wird das Zentrum eines Wirbelsturms *Auge* genannt.

Siehe auch

- Optik, Augenoptik
 - Optische Täuschung, Blickkontakt
 - Visuelle Wahrnehmung, Visuelles System
 - Strabologie, Neuroophthalmologie
 - Optografie
-

Einzelnachweise

- [1] online Das Augentierchen Euglena: Ein einzelliger Geißelträger des Süßwassers (<http://www.fortunecity.com/skyscraper/isp/1924/Euglena.html>)
- [2] Wilfried Westheide, Reinhard Rieger (Hrsg.): *Spezielle Zoologie. Teil 1: Einzeller und Wirbellose*. korr. u. erg. Nachdruck d. 1. Aufl., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin 2004, ISBN 3-8274-1482-2
- [3] H.-E. Gruner (Hrsg.); 1993; Lehrbuch der Speziellen Zoologie, Band I Wirbellose Tiere, 2. Teil: Cnidaria, Ctenophora, Mesozoa, Plathelminthes, Nemertini, Entoprocta, Nemathelminthes, Priapulida; Stuttgart, New York: Gustav Fischer Verlag
- [4] Jörg Peter Ewert, Sabine Beate Ewert; 1981; Wahrnehmung; Quelle und Meyer Heidelberg; ISBN 3-494-01060-9
- [5] Hans Ekehard Gruner (Hrsg.), M. Moritz, W. Dunger; 1993; Lehrbuch der speziellen Zoologie, Band I: Wirbellose Tiere, 4. Teil: Arthropoda (Ohne Insekta)
- [6] Wolf D. Keidel: Kurzgefasstes Lehrbuch der Physiologie, S. 422, Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1973
- [7] Herbert Kaufmann: *Strabismus*. Unter Mitarbeit von W. de Decker u. a., Georg Thieme Verlag, Ausgabe 3 - 2003, ISBN 3-13-129723-9
- [8] Ulrike Rockmann: Lernmaterialien Sinnesphysiologie. Das visuelle System (<http://www.uni-oldenburg.de/sport/bww2/Lehre/Sinne/auge.html>)
- [9] Axenfeld/Pau: *Lehrbuch und Atlas der Augenheilkunde*. Unter Mitarbeit von R. Sachsenweger u. a., Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1980, ISBN 3-437-00255-4
- [10] Versicherungsvertragsrecht - ein Grundriß. ISBN 978-3-89952-177-1 (http://books.google.de/books?id=2QFEo_vt5zAC&pg=PA170&lpg=PA170&dq=versicherung+verlust+eines+auges&source=bl&ots=5UrF21Q-so&sig=-tP7lcl5M0EcoB-hl-gbPCdecMo&hl=de&ei=r5nvTKjYCIqDswbfuGWCw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=8&ved=0CEQQQ6AEwBw#v=onepage&q=versicherung+verlust+eines+auges&f=false)
- [11] Peter Frost *Why Do Europeans Have So Many Hair and Eye Colors?* (http://pages.globetrotter.net/peter_frost61z/European-hair-and-eye-color.htm) Yet skin color is weakly influenced by the different alleles for hair color or eye color, apart from the ones for red hair or blue eyes. Some have no effect at all on skin pigmentation.
- [12] Duffy et al. 2004 *Interactive effects of MC1R and OCA2 on melanoma risk phenotypes* (<http://hmg.oxfordjournals.org/cgi/content/full/13/4/447>) All blue-eyed R/R individuals (Anm.: R steht für ein stark wirkendes Rothaarallel, im Gegensatz zu r. Beide sind aber rezessiv.) were in the fair/pale skin category but this decreased to 85.4% with fair/pale skin for brown/green-eyed R/R individuals, the remainder having medium skin color. This proportionate lightening in all genotypic groups when carrying both recessive blue-eyed b and red-hair R alleles indicates additive action of MC1R and BEY2/OCA2 loci on constitutive skin color.
- [13] Hans Eiberg et al. 2007 *Blue eye color in humans may be caused by a perfectly associated founder mutation in a regulatory element located within the HERC2 gene inhibiting OCA2 expression* (<http://www.springerlink.com/content/2045q6234h66p744/fulltext.html>).
- [14] Online Journal of Ophthalmology (<http://www.onjoph.com/patinfo/funktion/zahlen.html>)
- [15] Physiologie des Menschen. Robert F. Schmidt, Florian Lang, und Manfred Heckmann, Springer Verlag, Berlin, 2007. ISBN 978-3-540-32908-4 (http://books.google.de/books?id=0HLnfUTBk-wC&pg=PA380&lpg=PA380&dq=gewicht+des+auges&source=bl&ots=BrKYZAGFo-&sig=hDIbCTWst9cULO5h9rUf4cquOsM&hl=de&ei=NvPwTN7CJ8vrs9bf9KCFCw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=9&ved=0CE4Q6AEwCA#v=onepage&q=gewicht+des+auges&f=false)
- [16] L. Hyman u. a.: *Prevalence and causes of visual impairment in The Barbados Eye Study*. Ophthalmology 108:1751-1756 (2001).
- [17] Hoffnung für Blinde: Elektronische Sehhilfe in Aussicht (<http://science.orf.at/science/rattay/52586>)

Literatur

- Simon Ings: „Das Auge: Meisterstück der Evolution“. Hamburg: Hoffmann und Campe, 2008. ISBN 978-3-455-50072-1.
- Robert Nordsieck: „Die Augen der Weichtiere“, in: Reinhard Renneberg: „Bioanalytik für Einsteiger“, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, S. 132 f. ISBN 978-3-8274-1831-9.
- Axenfeld/Pau: *Lehrbuch und Atlas der Augenheilkunde*. Unter Mitarbeit von R. Sachsenweger u. a., Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, 1980, ISBN 3-437-00255-4

Weblinks

- LP – Das menschliche Auge als optisches System (<https://lp.uni-goettingen.de/get/text/881>) (Georg-August-Universität Göttingen)
- Lichtsinneszellen – Bau und Photorezeption (http://www.bio-faqs.de/ts_downl/BI-AB-Auge4.pdf) Unterrichtsmaterial (PDF; 513 kB)
- Katja Seefeldt: Wo Darwin noch erschauerte (<http://www.heise.de/tp/r4/artikel/18/18680/1.html>) – Ursprung des menschlichen Auges (Telepolis, 31. Oktober 2004)

bjn:Mata

Bildschirm

Ein **Bildschirm** (*Screen*, *Display* oder *Monitor*) ist ein Datenverarbeitungs- und -ausgabegerät bzw. ein Teil eines Ausgabegerätes zur Darstellung von visueller Information (Bildern oder Zeichen). Es ist somit eine Anzeige im technischen Sinne. Die Darstellung ist, im Gegensatz zum Videoprojektor (deren Projektionsfläche, etwa die „Leinwand“, englisch ebenfalls *screen* ‚Schirm‘ genannt wird), direkt auf dem Gerät sichtbar. *Displays* (englisch allg. ‚Anzeige‘) nennt man im Deutschen umfassender auch nichtoptische Anzeigegeräte (etwa Flip-dot displays), *Monitor* (engl. *monitoring* ‚Überwachung‘) nennt man nur Bildschirme als Bauteile oder Peripheriegeräte.



Bildschirme der Radarüberwachung



Informationsbildschirm in einem Flugzeug



Freistehende Werbetafel mit Bildschirm

Geschichte

Als Ausgabegerät kommen Bildschirme auf Basis von Braunschen Röhren seit den 1950er Jahren zum Einsatz, zunächst mit vektorieller Ansteuerung (siehe Vektorbildschirm). Die später aufgekommenen Videoterminals verwenden vorwiegend Rastergrafiken zum Aufbau des Bildes. Bei den meisten Videoterminals lassen sich die einzelnen Bildpunkte nicht direkt ansprechen, vielmehr übernimmt ein Zeichengenerator (*character processor*) die Darstellung von einzelnen Zeichen; die Anzahl und das Aussehen darstellbarer Zeichen ist somit vorgegeben.

In den frühen 1980er Jahren wurde zunehmend die graphische Ausgabe wichtiger, treibend hierbei war unter anderem die Entwicklung von CAD und von grafischen Benutzeroberflächen (GUI, Graphical User Interface), die mit dem Macintosh populär wurden.

In jüngster Zeit eroberten auf Flüssigkristalltechnik basierende Flachbildschirme den Massenmarkt; 2003 wurden nach einer Erhebung der *Gesellschaft für Unterhaltungs- und Kommunikationselektronik* (gfu) in Deutschland erstmals mehr Flüssigkristallbildschirme abgesetzt als konventionelle Geräte mit Bildröhre.

Frühe Personal Computer verfügten wie damalige Computerterminals häufig über integrierte Bildschirme. Heute ist das nur noch bei portablen Computern wie Notebooks und Handhelds üblich. Bildschirme für ortsfesten Einsatz werden heute in der Regel in separate Gehäuse eingebaut, die auch die Elektronik zu ihrer Ansteuerung beinhalten und meist über standardisierte Schnittstellen wie VGA oder DVI an eine in den Computer eingesteckte Grafikkarte angeschlossen werden.

Seit etwa 2001 gibt es auch Bildschirme, die dreidimensionale Bilder darstellen können, sogenannte autostereoskopische Displays oder auch *3D-Monitore*. Die Entwicklung befindet sich jedoch noch im Anfangsstadium, eine perfekt ausgearbeitete virtuelle Realität ist mit ihnen noch nicht möglich.

Bei einem sogenannten Smart Display handelt es sich um einen Monitor, der per Funk mit dem Rechner verbunden und so in Grenzen portabel ist.



Monochromer 12-Zoll-Computermonitor

Eigenschaften

Die Bildschirmdiagonale ist die Größenangabe des Bildschirms und bezieht sich immer auf die Diagonale der Bildröhre, diese ist in der Regel etwas größer als die sichtbare Diagonale. Das gilt jedoch nicht für Bauarten, die ohne eine herkömmliche Bildröhre auskommen, siehe dazu Flachbildschirm. Weitere Kennzeichen eines Monitors sind das Seitenverhältnis, die maximale Vertikalfrequenz, aus der sich für eine bestimmte Bildauflösung (z. B. 1024×768 Pixel) eine Bildwiederholfrequenz (z. B. 80 Hertz (Hz)) ergibt, die Helligkeit, der Kontrast, die Reaktionszeit sowie besonders bei Flüssigkristallbildschirmen die Anzahl der Pixel und der maximale Blickwinkel.

Mehrfachanzeige

Eine **Mehrfachanzeige** bzw. **Multifunktionsanzeige** dient der Darstellung mehrfacher Informationen. Dies kann ein einzelnes elektronisches Gerät oder ein Verbund-System mit mehreren Bildschirmen sein. Sinn und Zweck dabei ist, eine große Anzahl von benötigten Werten oder auch Bildern und Signalen zur gleichen Zeit mit mehreren Anzeigegeräten oder nacheinander auf ein und demselben *Display* anzeigen zu können. Dazu müssen vorgegebene oder aktuell aufbereitete Daten visualisiert werden und ausgegeben werden.

Heute wird dies bei einer Vielzahl von Anwendungen verwendet, beispielsweise beim elektronischen Fluginstrumenten-Anzeigesystem in Luftfahrzeugen; bei Mobiltelefonen (Handys); beim iPad, bei digitalem

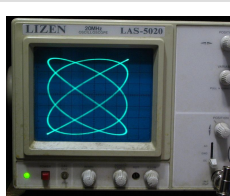
Fernsehen usw.

Bekannte und weit verbreitete Methoden zur simultanen Darstellung ist die Fenstertechnik – die dem Betriebssystem Windows zu seinem Namen verhalf – beim Personal Computer. Hierbei können verschiedene Programme in sogenannten „Fenstern“ nebeneinander angeordnet werden, wobei auch hier ein oder mehrere **Monitore** eingesetzt werden können.

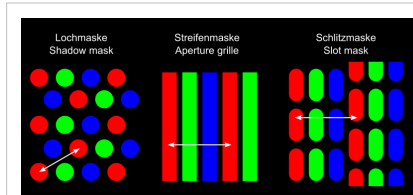
Darstellungstechniken

Verwendete Darstellungstechniken sind:

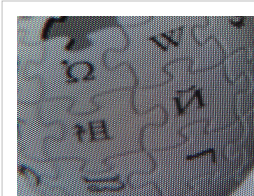
- Kathodenstrahlröhrenbildschirm („CRT“)
- Flüssigkristallbildschirm („LCD“)
- Dünnschichttransistorbildschirm („TFT“)
- Surface-conduction Electron-emitter Display („SED“)
- Plasmabildschirm
- Organische Leuchtdiode („OLED“)
- Feldemissionsbildschirm („FED“)



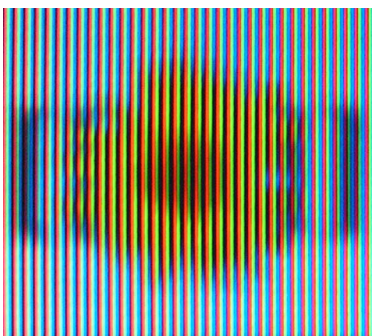
Kathodenstrahlröhre mit kontinuierlicher fluoreszierender Beschichtung (Oszilloskop)



Bildpunkt-Maskentypen (Pixeling)



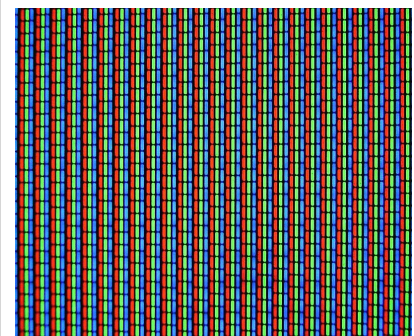
Röhrenmonitor-Wiedergabe (Lochmaske)



Röhrenmonitor-Wiedergabe (Streifenmaske)



Röhrenmonitor-Wiedergabe (Bildausschnitt). Alle Farbpunkte liegen auf einer Linie, die von drei Elektronenstrahlen (je Farbe einer) zeilenweise zum Leuchten angeregt werden.



Matrix eines Fernsehbildschirmes

Anwendungsgebiete

Anwendung finden diese in

- Bedienelementen von Maschinen und Geräten aller Art
- Anzeigegeräte in allen Bereichen der Technik
- Fernsehgeräten
- Computermonitoren
- Radargeräten, Oszilloskopen
- Bildgebenden Verfahren in Wissenschaft
- medizinischen Diagnose- und Überwachungsgeräten (Monitore)
- Notebooks, PDAs (Handhelds, Organizer), Mobiltelefonen
- Digitalkameras und Camcordern
- elektronischen Navigationsgeräten
- Werbeanzeigen, Informationschildern im Straßenverkehr

Siehe auch

- Bildschirmarbeitsverordnung
- Head-Mounted Display
- Display PostScript
- Breitbildmonitor
- Kontrastverhältnis
- TCO (Standard)
- elektronisches Papier
- Touchscreen
- Bildschirmmedium

Weblinks

- Bildschirmarbeitsverordnung (BildschArbV) ^[1] Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit an Bildschirmgeräten

Referenzen

[1] <http://www.gesetze-im-internet.de/bildscharbv/>

Blau

Blau

Blau ist der Farbreiz, der wahrgenommen wird, wenn Licht mit einer spektralen Verteilung ins Auge fällt, bei dem das Maximum im Wellenlängenintervall zwischen 460 und 480 nm^[1] liegt. Licht mit dieser Eigenschaft kann auch als Körperfarbe remittiert sein.

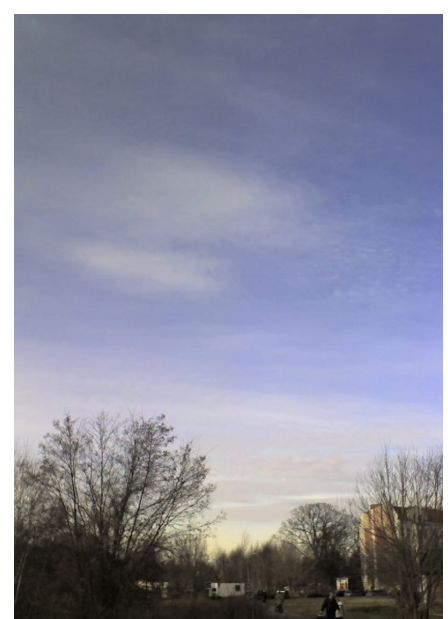
Etymologie

Das Wort „Blau“ stammt vom althochdeutschen *blao* für schimmernd, glänzend.

Farblehre

Zwei Grundfarben

Es gibt zwei blaue Grundfarben: Violettblau (B) und Cyanblau (C). Die Farbempfindung Violettblau entsteht durch ein Spektrum mit kurzwelligerem Anteil. Der Farbreiz des Cyanblau enthält einen mehr mittelwelligen Anteil.



Blau: Die Farbe eines klaren Wintertages (51° Nord), fast am Mittag, Blickrichtung West

Mittelblau Azurblau Lilablassblau Lichtblau Hellblau
Dunkelblau Graublau Cyanblau des CMYK NCS-Grundfarbe

Violettblau

- ist eine der Grundfarben der Additiven Farbmischung (neben Orangerot und Grün),
- entsteht durch die Mischung der Farben Magenta und Cyanblau in der Subtraktiven Farbmischung,
- ist die Komplementärfarbe zu Gelb,
- kann in Webbrowsern im RGB-Farbraum über den Wert RGB = (0, 0, 255) dezimal bzw. #0000FF hexadezimal dargestellt werden.

Cyanblau

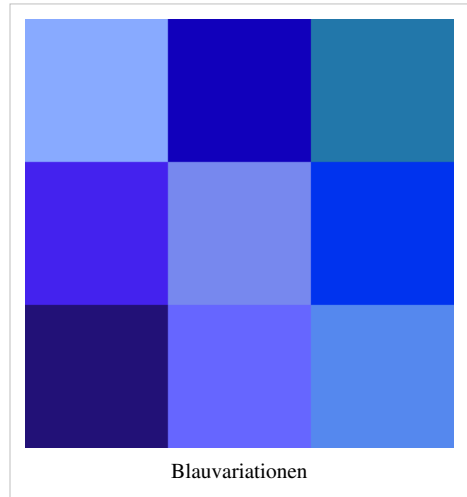
Die Farbvalenz Cyanblau entsteht, wenn Licht wahrgenommen wird, dessen spektrale Verteilung im Maximum zwischen 475 und 500 nm liegt. Der Mensch nimmt diese als Farbton zwischen Grün und Blau wahr. Ein anderer Begriff für diesen Farbton ist Türkis.

Farbtöne

Farbtöne von Blau sind Mischungen wie Grünblau, Violettblau (mit Rot), Himmelblau (mit Weiß), Nachtblau (mit Schwarz) oder Taubengrau (mit Schwarz und Weiß).

Farbvalenzen im Blau

Die menschlichen Sehzellen für Blau verarbeiten ein sehr enges Band des Lichtspektrums, daher reagiert das Auge sehr empfindlich auf Rotanteile in Blau. Ein Farbton ist sehr deutlich entweder Blau oder Violett, es gibt keinen ausgesprochenen Mischton. Rotstichige Blautöne werden als *warmes Blau* bezeichnet. Das erwähnte Ultramarinblau ist ein Beispiel dafür, blaustichige Rottöne heißen *kühles Rot*.



Farbmittel

Bekannte blaue Farbmittel sind Ultramarinblau, Kobaltblau, Berliner Blau, Azurit, Indigo. Weitere Pigmente und Farbstoffe finden sich in den zugehörigen Listenartikeln.

Eine alte Technik des Textildrucks benutzte beständige blaue Farbstoffe, vor allem Färberwaid und seit dem 17. Jahrhundert Indigo, im Blaudruck.

Farbphysik

Über die *Entstehung des Blauen* arbeiteten laut Goethe (*Goethe zu Eckermann, 16. Dezember 1828*) bereits Leonardo da Vinci und Newton, wobei die Ansicht des letzteren als Irrtum bezeichnet wurde. Die Entstehung des blauen Farbeindrucks des unbewölkten Himmels ist physikalisch komplex.

Verwendung/Techniken

Die blauen Cobaltsilikate sind häufig in der Keramikdekoration anzutreffen. Für die Bürgeler Keramik ist das dekorative Blau als Grundton im Einsatz. Indisch Blau ist ein Porzellandekor der Porzeline Triptis. Verwechselt wird es häufig mit dem ebenfalls blauen, traditionellen Zwiebelmuster des Meißner Porzellans.

Die Blaupause ist ein fotografisches Edeldruckverfahren bei dem Methylenblau eingesetzt wird.

Wirkung und Symbolik

- Blau ist eine Farbe, die auf den Menschen meist kalt wirkt. Die blauen Schatten in sonnig bestrahltem Eis und Schnee bewirken - insbesondere im Eisblau - das Gefühl von Kälte. Blau gehört zu den kalten Farben.^[2]
- Begünstigt durch das Blau des Himmels und dessen Widerspiegelung im Wasser steht Blau in Literatur und Grafik für Ferne und Sehnsucht. Im Weiteren wird dem Blau eine emotional ausgleichende, beruhigende und mäßigende Wirkung zugeschrieben.
- In der „endlosen“ Ausdehnung des blauen Himmels findet sich Beständigkeit, daraus folgend Harmonie, Sympathie und Zufriedenheit.
- Blau und Grün werden nicht in allen Kulturen so unterschieden wie bei uns^[3], obwohl der Grenzfall, das Türkis, auch im deutschsprachigen Raum in seiner Zuordnung vom individuellen Empfinden abhängig ist.
- Blau hat im Gegensatz zu Rot im Allgemeinen eine beruhigend-angenehme Wirkung auf den Menschen. Es fördert angeblich die Konzentration und hält wach.
- Wissen – Philosophie

Politik

- Blau steht für Jugend und Hoffnung, so haben Symbole von Jugendorganisationen diesen Farbton.
- Die Europaflagge besitzt gelbe Sterne für die Mitgliedsstaaten auf blauem Grund.
- Die Pan-blaue Koalition in Taiwan setzte mit der gewählten Farbe auf Demokratie, um sich von den nationalgesinnten Grünen abzugrenzen.
- Das traditionelle bayrische Blau - als blauer Himmel gedeutet - gab der nur in Bayern tätigen CSU die Grundfarbe.
- Die FDP setzt mit ihrem Blau-Gelb^[4] der Farbe auf Liberalismus, in Großbritannien ist es die Farbe der Konservativen Partei.
- Die Blaue Division spanischer Freiwillige, die bei der Niederschlagung der Spanischen Republik 1936–1939 wirkten, wählte diese Farbe in den Jahren 1941 bis 1943, als sie am Russlandfeldzug teilnahmen.

Der blaue Winkel

In den nationalsozialistischen Konzentrationslagern wurden vorbeugend inhaftierte Emigranten mit einem „blauen Winkel“ gekennzeichnet. Dieses auf der Spitze stehende blaue Dreieck diente der Wachmannschaft zur Unterscheidung von anderen Häftlingskategorien. Emigranten aus Deutschland oder den verbündeten Staaten wurden nach ihrer Wiederergreifung in den KZ in „Schutzhaft“ genommen^[5].

Religion

Die Farbe Blau des Himmels symbolisiert im Judentum Gott, Glauben und Offenbarung, auch trifft diese religiöse Interpretation für den blauen Davidstern in der Flagge Israels zu.

In der römisch-katholischen Farbsymbolik ist Blau die Farbe der Gottesmutter Maria und eine liturgische Farbe

Geschlechterdifferenzen

Blaustrumpf war die abwertende Bezeichnung für die ersten Angehörigen der Frauenbewegung. Heinrich VIII. wurde als Ritter Blaubart bekannt und steht im Ruf des Mordes an seinen Ehefrauen. Der Begriff "Blaubart" wurde so für Frauenmörder übernommen.

Lange Zeit galt nicht das Blau als „männliche“ Farbe. Rot hat die Assoziationen Leidenschaft, Blut, aktiver Eros und Kampf,^[6] Blau dagegen ist in der christlichen Tradition die Farbe von Maria. Nach dem Ersten Weltkrieg, ab etwa 1920, fand ein Umbruch der Auffassungen statt, die Farbe Blau wurde zum Symbol für die Arbeits- und Männerwelt. Die Blautöne der Marineuniform, blaue Arbeitsanzüge, der Blaumann förderte die Symbolik. Jungen trugen die zu Anfang des 20. Jahrhunderts modischen (*marineblauen*) Matrosenanzüge.^[7] Diese Betrachtungen sind auch bei den „kleinen“, „kindlichen“ Farben Rosa und Hellblau anzutreffen.

Verkehr und Signal

Bei Verkehrszeichen wird Blau als Signalfarbe eingesetzt und steht hierbei für „vorgeschrieben“ und ist die Grundfarbe der Gebotsschilder.

Aber auch Rettung soll Blau verdeutlichen. Eine wichtige Signalflagge ist der Blaue Peter.

Die Blaue Zone ist der Innenstadtbereich mit blau markierten Parkflächen.

Die Signalwirkung geht aber auch auf die bewusste Abgrenzung der hellen Farben: Rot, Gelb, Grün:

- Blaues Band, die Ehrung für das schnellste Schiff auf der Transatlantik-Route
- Blaue Liste, der Zusammenschluss deutscher Forschungsinstitute unterschiedlicher Fachrichtung.
- Blaulicht, das Signal von Einsatzfahrzeugen, insbesondere der Feuerwehr und des Rettungsdienstes.
- Blauhelm, die Friedenstruppen der Vereinten Nationen tragen blaue Helme in auffälliger und seltener Militärfarbe.



Alkohol

- *blau sein* bedeutet „betrunken sein“, die Entstehung der Redewendung ist nicht sicher geklärt. Im Französischen spricht man stattdessen von „grau sein“ (*être gris*) und bei schwerer Trunkenheit von „schwarz sein“ (*être noir*).
- Im Blauen Kreuz ist diese Bedeutung für die Ablehnung von Alkohol gesetzt, eine christliche Organisation, die sich um Hilfe für Suchtkranke bemüht.

Blaues Blut

Die früher „Blausucht“ genannte Zyanose beruht grundsätzlich auf einem Sauerstoffmangel im Blut, der dieses blau-violett erscheinen lässt. Bei bestimmten Vergiftungen (z.B. mit Zyanwasserstoff, „Blausäure“) kann auf Grund der besseren Bindung der Giftstoffe an das Hämoglobin die Sauerstoffaufnahme des Blutes behindert sein.

Der Ausspruch *Blaues Blut besitzen* für „von adliger Herkunft sein“ ist dagegen symbolischer Art. Adlige, also jene die nicht bäurisch im Freien, in der Landwirtschaft arbeiteten, haben eine (ungebräunte) blasse und durchscheinende Haut. Das venöse Blut schimmert dabei blau durch die Haut. In diesem Sinnzusammenhang mit dem Adel steht Blau für „edel“.

Ferne

- Die *Fahrt ins Blaue* stammt aus früheren Zeiten, als noch häufig der blau blühende Flachs angebaut wurde. Machte man einen Ausflug in die Natur, so fuhr man *ins Blaue*.
- Blauer Montag ist die Bezeichnung für einen arbeitsfreien (geruhsam verbrachten) Montag. Darauf bezogen ist „Blau machen“ ist umgangssprachlich ein Synonym für „krankfeiern“, das Fernbleiben von einer Pflichtveranstaltung, insbesondere der Arbeit und der Schule.
- Freiheit
- Blaue Berge, die Blue Mountains auf Jamaika, die fernen Berge sind durch die Luftfilterung blau.

Blau in Kunst und Kultur

Literarische Bedeutung erlangte im 19. Jahrhundert das Motiv der *blauen Blume*. In Novalis' Roman *Heinrich von Ofterdingen* steht sie für die Ferne, die Hoffnung. Sie wurde zum Sinnbild der romantischen für die Suche nach Erfüllung. „Die Schöne Lau“ ist ein Kunstmärchen um eine kinderlose Prinzessin von Eduard Mörike, das in Blaubeuren spielt. Die blaue Blume wurde zu einem Motiv der Romantik und der Sehnsucht.

Seit 2000 findet in Nürnberg jedes Jahr Mitte Mai die Blaue Nacht statt. Dabei handelt es sich um eine „Lange Nacht der Museen“, bei der auch in den Straßen künstlerische Installationen und Performances stattfinden. Blau ist die beherrschende Farbe in dieser Nacht (Illumination von Gebäuden, Dekoration teilnehmender Museen), möglichst mit einem „blauen“ Thema, wie Wasser, Luft.

Der Blauer Reiter war ein Zusammenschluss von Malern des Expressionismus.

Der französische Künstler Yves Klein verwendet in vielen seiner monochromen Bilder ausschließlich die Farbe Blau, IKB für *International Klein Blue*.

Die Regisseure Jean-Luc Godard, James Cameron und besonders Michael Mann setzen Blau hervorgehoben im Kinofilm ein. Krzysztof Kieślowski schuf 1993 *Drei Farben: Blau*, der eines der Ideale der französischen Revolution behandelt.

Blauer Mond steht für einen zweiten Vollmond innerhalb eines Monats und gilt übertragen für ein seltenes Ereignis.



Blaue Blume (Stängelloser Enzian)

Kampfsport

In vielen Kampfkünsten – wie Jiu Jitsu, Judo und Karate – wird ein Gürtel (jap. Obi) als Teil der Kampfsportkleidung (jap. Keikogi) getragen. Der blaue Gurt repräsentiert den Kenntnisstand des Budoka und ist den fortgeschrittenen Schülergraden (jap. Kyu-Grad) vorbehalten.

Heraldik

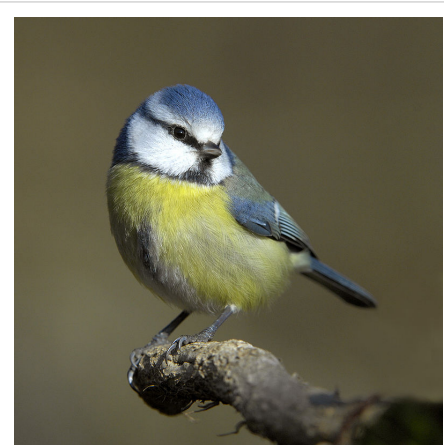
In der Heraldik gehört Blau zu den klassischen Tinkturen. Es gehört wie Grün, Rot und Schwarz zu den heraldischen Farben, im Gegensatz zu den Metallen Gold und Silber.



Budo-Gürtel (jap. Obi) in den Farben der fünf Schülergrade (jap. Gokuyū).

Siehe auch

- Augenfarbe: blaue Augen korrelieren mit der blonden Haarfarbe.
- Tiere in Blau oder Blaugrau
 - Blaualgen sind Bakterien mit der Fähigkeit zur oxygenen Photosynthese
 - Blaufuchs, eine Farbvariante des Polarfuchs (Eisfuchs)
 - Blaufußtölpel ist eine Vogelart
 - Bläulinge sind eine Schmetterlingsart
 - Blauehlchen ist ein Singvogel Mitteleuropas
 - Blaumeise ist eine Meisenart
 - Blauwal, die größte Walart
- Pflanzen
 - Blaubeere, anderer Name der Heidelbeere
 - Blaue Mauritius, eine Hängepflanze aus der Familie der Windengewächse, *Convolvulus sabatius*
 - Blaukraut, eine Sorte des Kohls
 - Blauschimmel, (1) eine Käseart mit blauem Edelschimmel, (2) eine Pilzkrankheit des Tabak
 - Blausterne sind eine Pflanzengattung
 - Blaufäule ist eine Nadelholzkrankheit
 - Blauer Schwede ist eine Kartoffelsorte die durch Anthocyane ihre Farbe hat
 - Blauglockenbaum ist eine Pflanzenart auch China
- Blaue Mauritius ist eine berühmte, seltene Briefmarke
- Blauer Nil, ein Quellfluss des Nil
- Blautopf, die Karstquelle in der Stadt Blaubeuren
- Blaukreuz eine Gruppe chemischer Kampfstoffe



Cyanistes caeruleus (Blaumeise)

Literatur

- Hans Gercke (Hrsg.): *Blau: Farbe der Ferne* (Ausstellungskatalog), Heidelberg (Verlag Das Wunderhorn) 1990, ISBN 3-88423-063-8
- H. Dittmar-Ilgen: *Wie das Salz ins Meerwasser kommt....* Hirzel-Verlag, Stuttgart
- Katholisches Institut für Medieninformation und Katholische Filmkommission für Deutschland (Hrsg.): *film-dienst 10/02 thema Blau*. Nr. 10, KIM Katholisches Institut für Medieninformation, Köln 2002, ISSN 0720-0781 ^[8].
- Harald Küppers: *Schnellkurs Farbenlehre*, DuMont Literatur und Kunst Verlag, Köln 2005. ISBN 3-8321-7640-3
- Dietmar Schuth: *Die Farbe Blau: Versuch einer Charakteristik*, Münster 1995 (Theorie der Gegenwartskunst; Bd. 5)
- Angelika Overath: *Das andere Blau. Zur Poetik einer Farbe im modernen Gedicht*, Stuttgart 1987
- Angelika Lochmann, Angelika Overath: *Das blaue Buch. Lesarten einer Farbe*. München 1988

Weblinks

- Kleiner Streifzug durch die Kulturgeschichte der Farbe Blau ^[9]
- Lexikon zu Farbwirkungen in der Kunst ^[10]

Einzelnachweise

- [1] Franz Wenzel: *AGFA-Lichtfilter*. fotokino-verlag, Halle 1957
- [2] Hans Gekeler: *DuMont's Handbuch der Farben*, Köln 1988. Seite 130 ff.
- [3] dazu auch der Artikel Grün und blau in verschiedenen Sprachen
- [4] Netzwerk Blau-Gelb (http://www.focus.de/politik/deutschland/deutschland-netzwerk-fuer-blau-gelb_aid_168578.html)
- [5] KZ-Häftlingskleidung (<http://www.bis.uni-oldenburg.de/dissertation/2000/schges00/pdf/abb.pdf>)
- [6] Birgit Schwaner: *Feen, Vamps und Babypuppen* (<http://www.wienerzeitung.at/Desktopdefault.aspx?TabID=3946&Alias=wzo&lexikon=W&letter=W&cob=212513>), wienerzeitung.at, 23. Dezember 2005.
- [7] Caroline Kaufmann: *Zur Semantik der Farbadjektive rosa, pink und rot* (http://edoc.ub.uni-muenchen.de/archive/00006326/01/Kaufmann_Caroline.pdf). Dissertation für den Doktor der Psychologie, Herbert Utz Verlag, München 2006, ISBN 3-8316-0652-8.
- [8] <http://dispatch.opac.d-nb.de/DB=1.1/CMD?ACT=SRCHA&IKT=8&TRM=0720-0781>
- [9] <http://www.blau-so-blau.de/>
- [10] <http://www.seilnacht.com/Lexikon/FBlau.htm>



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Brechung (Physik)

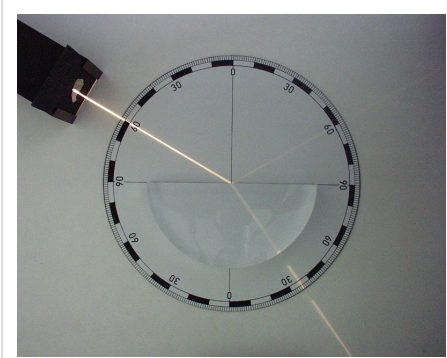
Brechung oder **Refraktion** (engl. *refraction*) bezeichnet die Änderung der Ausbreitungsrichtung einer Welle aufgrund einer räumlichen Änderung ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit, die speziell für Lichtwellen durch den Brechungsindex n eines Mediums beschrieben wird. Allgemein tritt Brechung bei jeder Art von Wellen auf, die sich in mehr als einer Dimension ausbreiten, etwa Schallwellen und Wasserwellen.

Die Brechung ist, anders als Beugung (engl. *diffraction*), Gegenstand der Strahlenoptik, welche für Strukturen gilt, die groß im Vergleich zur Wellenlänge sind. An Grenzflächen tritt durch Brechung ein Knick im Strahl auf, der durch das Brechungsgesetz beschrieben wird. Bei kontinuierlicher Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit werden Strahlen gekrümmt, siehe etwa Astronomische Refraktion. In beiden Fällen gilt das Fermatsche Prinzip, wonach Strahlen Wege extremaler, meist minimaler Laufzeit bzw. Länge nehmen.

Anisotrope Materialien sind doppelbrechend, das heißt, die Anteile einer Welle werden in Abhängigkeit ihrer Polarisierung unterschiedlich (stark) gebrochen.

Anwendungen

Vielfältige Formen der Brechung von Wellen finden sich in der Natur. Diese Bildserie zeigt beispielhaft die veränderte erscheinende Form eines Stabes durch Lichtbrechung, nachdem er in Wasser eintaucht. Deshalb verlangt es einige Übung, um Fische von der Oberfläche aus im Wasser zu ergreifen.



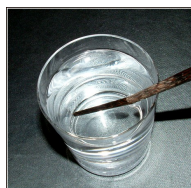
Brechung und Reflexion eines Lichtstrahls an einem Plexiglas-Halbkreiskörper



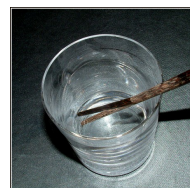
Brechung an Wassertropfen, die wie eine Sammellinse wirken (Motiv: Golden Gate Bridge)



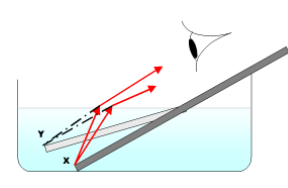
Ein Stab, der in einem leeren Glas steht.



Nach dem Zufüllen von Wasser erscheint der Stab etwas abgelenkt.



Vergleich der zwei Bilder (Überlagerung).



Schemazeichnung zur Erklärung des Effekts der 'optischen Hebung'

Die Brechung von elektromagnetischen Wellen und speziell die von Licht hat große Bedeutung in der technischen Optik. Sie bestimmt die Funktion von Prismen und Linsen.

An Übergängen zwischen Materialien unterschiedlicher Schallgeschwindigkeit werden seismische Wellen in charakteristischer Weise gebrochen. Geophysiker nutzen daher die Brechung von durch Erdbeben ausgelösten Wellen, um Erkenntnisse über den Aufbau des Erdinneren zu gewinnen.

Weblinks

- Brechung von Lichtstrahlen ^[1] Ausführliche Erläuterung von Brechung und Totalreflexion anhand von praktischen Beispielen und sehr guten Grafiken
- Reflection and Refraction - java - engl. ^[2]
- Mineralienatlas Lichtbrechung ^[3]
- Reflexion und Brechung von Licht - java ^[4]
- Dynamische Arbeitsblätter zum Thema "Brechung und Totalreflexion" ^[5]
- **Flash-Animation** Zu Brechung und Totalreflexion ^[6]
- Refraktionsmodelle und der Aufbau der Atmosphäre ^[7]
- Schülernahe Erklärungen zum Thema "Brechung" ^[8]
- Lerneinheit zur Brechung des Lichts ^[9]
- Animation zu Geschwindigkeitsänderung und Brechung ^[10] Schlitten fährt auf eine mit Sand gestreute Schneefläche

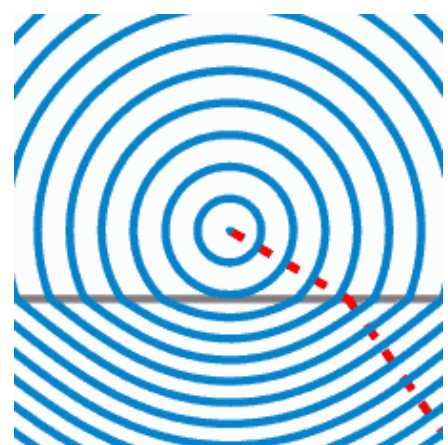
Referenzen

- [1] <http://www.filmscanner.info/Strahlenoptik.html>
- [2] <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/viewtopic.php?t=32>
- [3] <http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Lichtbrechung>
- [4] <http://www.walter-fendt.de/ph14d/brechung.htm>
- [5] http://www.geogebra.at/de/upload/files/dynamische_arbeitsblaetter/lwolf/brechung/brechung.html
- [6] <http://www.zum.de/dwu/depotan/apop101.htm>
- [7] <http://home.germany.net/100-15891/geo/vortrag/tropo.htm>
- [8] http://www.leifiphysik.de/web_ph09/materialseiten/11_brechung.htm
- [9] <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ph/14/ep/einfuehrung/geooptik/brechung.vlu.html>
- [10] <http://www.muenster.de/~ullwer/P-Buch/Optik/brechung.htm>

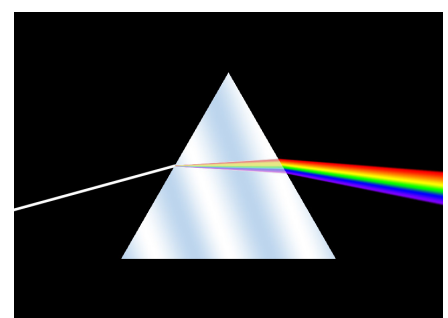
Brechungsindex

Der **Brechungsindex**, auch die **Brechzahl**, ist eine optische Materialeigenschaft. Diese physikalische dimensionslose Größe gibt an, um welchen Faktor die Wellenlänge und die Phasengeschwindigkeit des Lichts kleiner sind als im Vakuum.

An der Grenzfläche zweier Medien mit unterschiedlichem Brechungsindex wird Licht gebrochen und reflektiert. Dabei nennt man das Medium mit dem höheren Brechungsindex das *optisch dichtere*. Dies ist nicht zu verwechseln mit der optischen Dichte als Maß für die Extinktion.



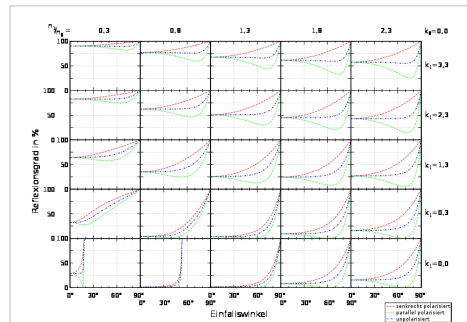
Wellenfronten, die von einem Punkt ausgehen, beim Übergang in ein Medium mit einem höheren Brechungsindex. Die Phasengeschwindigkeit der Welle ist unterhalb des grauen Strichs niedriger. Die oben kugelförmigen Wellenfronten sind unten nahezu hyperbolisch.



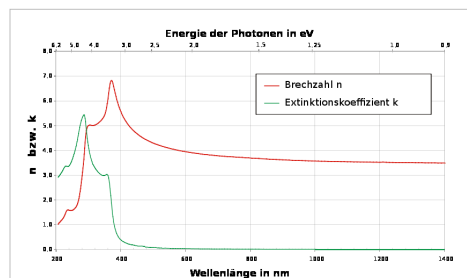
Der Brechungsindex von Glas ändert sich mit der Wellenlänge (Dispersion). Deshalb wird weißes Licht in Spektralfarben zerlegt.

Physikalische Grundlagen

Die Bezeichnung „Brechungsindex“ kommt vom Begriff Brechung und seinem Auftreten im Snelliusschen Brechungsgesetz. Zusätzlich hat diese physikalische Größe keine Einheit und ist somit eine dimensionslose Zahl. Der Brechungsindex n gibt das Verhältnis der Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 zur Ausbreitungsgeschwindigkeit c_M des Lichts im Medium an:



Einfluss des komplexen Brechungsindex eines Materials ($n_1 + ik_1$) auf das Reflexionsverhalten eines Lichtstrahls beim Auftreffen auf die Grenzfläche Luft/Material



Verlauf des wellenlängenabhängigen komplexen Brechungsindex im visuellen Bereich für einen Halbleiter mit Bandübergängen in diesem Bereich

$$n = \frac{c_0}{c_M}$$

Zur Berücksichtigung weiterer Effekte, wie der Absorption der Welle im Medium, kann der Brechungsindex auch als komplexe Zahl angegeben werden. Hierbei sind unterschiedliche Symboliken gängig:

$$n(\omega) = n'(\omega) + i n''(\omega) = n'(\omega) + i k(\omega) = n'(\omega) [1 + i \kappa(\omega)]$$

wobei $n(\omega)$ die Lichtgeschwindigkeit im Medium festlegt, ω die Kreisfrequenz (2π -Frequenz) der Strahlung,

$k(\omega) = n''(\omega)$ der wellenlängenabhängige Extinktionskoeffizient und $\kappa(\omega)$ der wellenlängenabhängige Absorptionsindex des Materials ist.

Der Brechungsindex ist frequenz- und damit auch wellenlängenabhängig. Dieser als Dispersion bezeichnete Effekt ermöglicht beispielsweise die Zerlegung von weißem Licht in seine Spektralfarben an einem Prisma. Die Frequenzabhängigkeit des (komplexen) Brechungsindex in Materie kann recht gut über das Modell des Lorentz-Oszillators beschrieben werden.

Absorptionskoeffizient und -index

Über den Extinktionskoeffizienten ist es möglich, die Extinktion, also die Schwächung von Strahlung beim Durchgang durch Materie, zu beschreiben.

Eine in das Medium in z-Richtung eindringende Welle (Wellenvektor $\vec{k} = k \hat{e}_z$) klingt gemäß $\exp(-n''\omega z/c)$ exponentiell ab. Ersetzt man in

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i[\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t]} = \vec{E}_0 e^{i[kz - \omega t]}$$

die Kreiswellenzahl, die dem Betrag des Wellenvektors entspricht $k = |\vec{k}|$ (Vorsicht: Verwechslungsgefahr mit dem Extinktionskoeffizienten $k = n''$), mit

$$k = \frac{\omega}{c_0} N = \frac{\omega}{c_0} (n' + i n''),$$

so erhält man das abklingende Verhalten (evaneszente Welle):

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i[(n' + i n'') \frac{\omega}{c_0} z - \omega t]} = \vec{E}_0 e^{-n'' \frac{\omega}{c_0} z} e^{i[n' \frac{\omega}{c_0} z - \omega t]}$$

Man betrachtet weiterhin obige evaneszente Welle. Die Intensität $I \propto |E|^2$ nimmt also exponentiell ab

$$I = I_0 e^{-2n'' \frac{\omega}{c_0} z} = I_0 e^{-\alpha z}$$

Dabei wurde der Absorptionskoeffizient $\alpha = 2n'' \frac{\omega}{c_0}$ eingeführt.

Oft wird der Extinktionskoeffizient n'' fälschlicherweise mit dem Absorptionskoeffizienten α oder dem Absorptionsindex κ gleichgesetzt. Sie lassen sich jedoch ineinander umwandeln, es gilt:

$$\frac{\alpha c_0}{2\omega} = n'' = n' \kappa$$

wobei c_0 die Vakuumlichtgeschwindigkeit und $\omega = 2\pi\nu$ die Kreisfrequenz des Lichtes ist.

Permittivitätszahl

Der komplexe Brechungsindex ist mit der Permittivitätszahl (dielektrische Funktion) ϵ_r und der Permeabilitätszahl μ_r verknüpft.

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

Dabei sind alle Größen im Allgemeinen komplex und frequenzabhängig.

Wenn man die Wellenlängenabhängigkeit (Dispersion) des Brechungsindex eines Materials theoretisch ermitteln will, geht man über die elektrische Suszeptibilität, die die Beiträge der verschiedenen Mechanismen im Material zu den Eigenschaften erfasst und in der komplexen Permittivität mündet. Im Fall von nichtmagnetischen Material ist $\mu_r \approx 1$ und der komplexe Brechungsindex kann direkt aus Real- (ϵ_1) und Imaginärteil (ϵ_2) der Permittivitätszahl angegeben werden:

$$n = \sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{\epsilon_1 + i\epsilon_2}$$

Hieraus kann man die Größen n und k berechnen:

$$n^2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2} + \epsilon_1 \right)$$

$$k^2 = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2} - \epsilon_1 \right)$$

Gruppenbrechungsindex

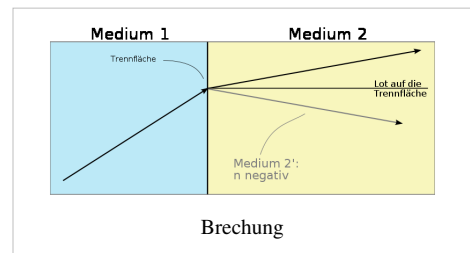
Das Verhältnis der Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 und der Gruppengeschwindigkeit c_g des Lichts im Medium ist der **Gruppenbrechungsindex** n_g . Diese von der Wellenlänge λ des Lichts abhängige Materialeigenschaft wird auch *Gruppenbrechzahl* genannt.

$$n_g(\lambda) = \frac{c_0}{c_g(\lambda)}$$

Die Gruppengeschwindigkeit hat im Vakuum den gleichen Wert, wie die Phasengeschwindigkeit. Zudem ist dieser Wert unabhängig von der Wellenlänge des Lichts. Im Medium ist das nicht notwendigerweise der Fall. Besonders bei Wellenlängen, für die das Material große Dispersion zeigt, ergeben sich Unterschiede.

Andere Definitionen

Die Definition des Brechungsindex erfolgte oben über die Geschwindigkeit, mit der sich Licht im Material ausbreitet. Dieses Vorgehen ist naheliegend, aber nicht in allen Fällen anwendbar. Beispielsweise können Meta-Materialien dem geometrischen Strahlengang nach einen negativen Brechungsindex aufweisen. Eine negativer Wert der Lichtgeschwindigkeit ist jedoch nicht sinnvoll definiert.



Alternative Definitionen des Brechungsindex bei denen dieses Problem nicht auftritt, sind:

- Über das Fermatsche Prinzip, nach welchem das Licht zwischen zwei Punkten jenen Weg zurücklegt, für den es einen Extremwert der Zeit benötigt.
- Über das Huygenssche Prinzip, das besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront als Ausgangspunkt einer Kugelwelle angesehen werden kann und die Interferenz aller dieser Wellen die weiter propagierende Wellenfront ergibt.
- Über die Strahlenoptik. Nach dem erwähnten Snellius-Brechungsgesetz entspricht n dem Sinus-Verhältnis von Einfallswinkel und gebrochenem Winkel.

Alle diese Definitionen liefern für gewöhnliche, optische Materialien den selben Wert.

Brechungsindex der Luft und anderer Stoffe

Brechungsindizes für ausgewählte Materialien im Bereich des sichtbaren Lichts

Material	Brechungsindex n_D (bei 589 nm)
Vakuum	exakt 1
Luft (bodennah)	1,000292
Plasma	0 ... 1
Caesium ^[1]	0,35
Aerogel	1,007 ... 1,24
Eis	1,31
Wasser	1,33
menschl. Augenlinse	1,35 ... 1,42

Ethanol ^[2] (liqu.)	1,3614
Magnesiumfluorid	1,38
Flussspat (Calciumfluorid)	1,43
menschliche Epidermis	1,45
Tetrachlorkohlenstoff (liqu.)	1,46
Quarzglas	1,46
Glyzerin	1,47399
Celluloseacetat (CA)	1,48
PMMA (Plexiglas™)	1,49
Benzol (liqu.)	1,49
Kronglas	≈ 1,46 ... 1,65
Mikroskopische Deckgläser	1,523
COC (ein Kunststoff)	1,533
PMMI (ein Kunststoff)	1,534
Quarz	1,54
Halit (Steinsalz)	1,54
Polystyrol (PS)	1,58
Polycarbonat (PC)	1,585
Epoxidharz	≈ 1,55 ... 1,63
Flintglas	≈ 1,56 ... 1,93
Kohlenstoffdisulfid (liqu.)	1,63
Kunststoffglas für Brillen (phototrop)	bis 1,67 (1,60)
Diiodmethan (liqu.)	1,742
Rubin (Aluminiumoxid)	1,76
Mineralglas für Brillen (polarisierend)	bis 1,9 (1,5)
Glas	1,45 ... 2,14
Bleikristall	bis 1,93
Zirkon	1,92
Schwefel	2,00
Zinksulfid	2,37
Diamant	2,42
Titandioxid (Anatas)	2,52
Siliciumcarbid	2,65 ... 2,69
Titandioxid (Rutil)	3,10
Bleisulfid (PbS, 590 nm)	3,90

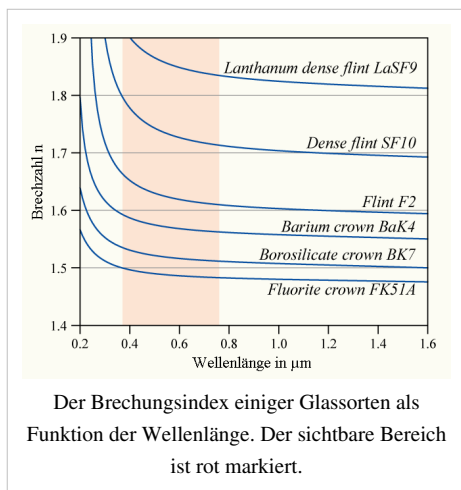
Größenordnungen

Vakuum hat einen Brechungsindex von exakt 1. Im sichtbaren Bereich sind die Brechungsindizes realer Materialien so gut wie immer größer als 1. Für jeden Stoff gibt es jedoch Wellenlängen (z. B. oberhalb des sichtbaren Bereiches), bei denen der Brechungsindex kleiner als 1 wird (aber positiv bleibt). Für sehr kleine Wellenlängen (Röntgenstrahlung, Gammastrahlung) ist der Brechungsindex immer kleiner als 1 und nähert sich mit sinkender Wellenlänge der 1 von unten an. Beispielsweise im Röntgenbereich ist die Darstellung $n = 1 - \delta$ üblich, wobei typische Werte für δ zwischen 10^{-9} und 10^{-5} liegen (stark abhängig von der Wellenlänge, abhängig von der Ordnungszahl und Dichte des Materials).

Luft

Der Brechungsindex der Luft beträgt auf Meeresniveau durchschnittlich 1,00029. Er hängt ab von der Dichte und der Temperatur der Luft sowie von der speziellen Zusammensetzung der Luft – insbesondere der Luftfeuchtigkeit. Da die Luftdichte nach oben – entsprechend den Gasgesetzen in einem Schwerfeld – exponentiell abnimmt, siehe barometrische Höhenformel, beträgt er in etwa 8 km Höhe nur mehr 1,00011. Dennoch werden die von Sternen kommenden Lichtstrahlen in Horizontnähe um $0,6^\circ$ gehoben und in 45° noch um $0,017^\circ$. Der Effekt heißt *astronomische Refraktion* und beeinflusst in ähnlicher Art auch jede terrestrische Vermessung. Im technischen Bereich wird manchmal zur Vereinfachung der Brechungsindex der Materialien auf den von Luft bezogen, ohne dass eine einheitliche Bezeichnung für diese leicht abweichenden Werte etabliert wäre.

Wellenlängenabhängigkeit



Da wie in der Einleitung beschrieben der Brechungsindex jedes Materials von der Wellenlänge des einfallenden Lichts abhängt – gilt auch bei elektromagnetischen Strahlungen anderer Wellenlängenbereiche – wäre es notwendig, diesen auch wellenlängenabhängig (tabellarisch oder als Funktion) anzugeben. Da dies aber für viele einfache Anwendungen nicht notwendig ist, wird der Brechungsindex üblicherweise für die Wellenlänge der Natrium-D-Linie (589 nm) angegeben. In der linken Abbildung sind als Beispiel Kurven des wellenlängenabhängigen Brechungsindex einiger Glassorten dargestellt. Sie zeigen den typischen Verlauf einer normalen Dispersion.

Messung des Brechungsindex

Zur experimentellen Bestimmung des Brechungsindex eines Mediums mit $\mu_{r2}(\text{med}) = \mu_{r1}(\text{Luft})$ (zum Beispiel nicht magnetisch) n_{med} kann man zum Beispiel den Brewster-Winkel beim Übergang von Luft in dieses Medium messen. Für diesen Fall gilt $\tan(\alpha_{\text{Brewster}}) = \frac{n_{\text{med}}}{n_{\text{Luft}}} \approx n_{\text{med}}$. Für die Messung wird ein Refraktometer angewandt.

Eine Abschätzung des Brechungsindexes ist mit der sogenannten Immersionsmethode durch das Eintauchen eines Gegenstands in durchsichtige Flüssigkeiten mit verschiedener Dichte möglich. Wenn die Brechzahlen von Gegenstand und Flüssigkeit identisch sind, verschwinden die Konturen des Gegenstands. Dieses Verfahren kann leicht eingesetzt werden, um zum Beispiel Rubine oder Saphire mit einer Brechzahl von rund 1,76 zu identifizieren, indem sie in eine geeignete Schwerflüssigkeit eingetaucht werden, wie beispielsweise Diiodmethan (Brechzahl =

1,74).

Anwendung

In der Chemie wird der Brechungsindex bei einer bestimmten Temperatur oft eingesetzt, um flüssige Substanzen zu charakterisieren. Die Temperatur und die Wellenlänge, bei der der Brechungsindex bestimmt wurde, werden dabei dem Symbol für den Brechungsindex angefügt, für 20 °C und die Natrium-D-Linie z. B. n_D^{20} .

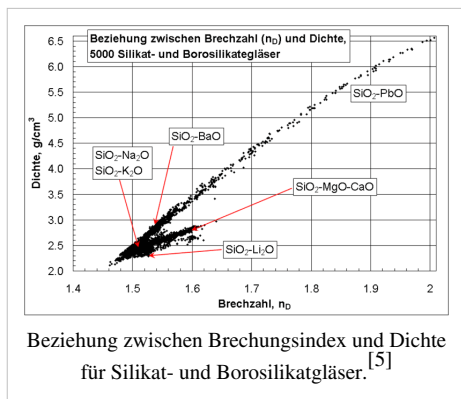
Die Bestimmung des Brechungsindex erlaubt eine einfache Bestimmung des Gehaltes einer bestimmten Substanz in einem Lösungsmittel:

- Zucker in Wein, siehe Grad Brix und Grad Oechsle
- Harz in Lösungsmittel
- Gefrierschutzmittel (meist Ethylenglycol) im Kühlwasser von Verbrennungsmotoren oder thermischen Solaranlagen

Mikroprozessoren werden mittels Photolithographie hergestellt. Die Ätzmaske wird dabei durch ultraviolettes Licht einer Wellenlänge von 193 Nanometern übertragen. *Normalerweise* sind die kleinstmöglichen Abmessungen durch die halbe Wellenlänge begrenzt. Durch Einsatz von Flüssigkeiten mit einem Brechungsindex von 1,6 gelingt es Entwicklern bei IBM, ein Gitter paralleler Linien einer Dicke von nur 29,9 Nanometern zu erzeugen. Dadurch ist bei der Chipherstellung eine zukünftige weitere Steigerung unter Verwendung der gleichen Lichtquelle möglich.^{[3] [4]}

Zusammenhang von Brechungsindex und atomaren Aufbau des Materials

Der Brechungsindex eines Material hängt direkt mit seinem atomaren Aufbau zusammen. Der Grad der Kristallinität und das Kristallgitter eines Festkörpers wirken sich auf dessen Bandstruktur und somit auf den Brechungsindex aus. Im sichtbaren Spektrum zeigt sich dies beispielsweise bei der Verschiebung der Bandlücke. Durch einen anisotropen Kristallaufbau können zusätzlich Effekte wie die Doppelbrechung entstehen, bei dem das Material für unterschiedlich polarisiertes Licht abweichende Brechungsindizes besitzt.



Bei teilkristallinen oder amorphen Materialien hat der atomare Aufbau ebenfalls deutlichen Einfluss auf den Brechungsindex. So erhöht sich in der Regel der Brechungsindex von Silikat- und Borosilikatgläsern mit ihrer Dichte. Zum Beispiel haben Bleisilikatgläser mit hoher Dichte auch einen hohen Brechungsindex. Es gilt jedoch zu beachten, dass trotz des allgemeinen Trends die Beziehung zwischen Brechungsindex und Dichte nicht immer linear ist und dass Ausnahmen auftreten, wie links im Diagramm dargestellt. Ein relativ hoher Brechungsindex und niedrige Dichte kann man mit Gläsern erhalten, die leichte Metalloxide wie Li_2O oder MgO enthalten, während das Gegenteil mit PbO - und BaO -haltigen Gläsern erreicht

wird.

Negative Brechungsindizes

1964 sagte der sowjetische Physiker Victor Veselago die Existenz von Materialien mit negativen Brechungsindizes voraus.

2002 gelang es Forschern um S. Sridhar von der Northeastern University in Boston, einen Verbundwerkstoff herzustellen, der ein feines Gitter aus Metalldrähten enthält, das für Mikrowellen einen negativen Brechungsindex zeigt.^[6]

2003 hat eine Gruppe um Yong Zhang in Colorado entdeckt, dass Kristalle aus Yttrium-Vanadat (YVO_4), einer Verbindung von Yttrium, Vanadium und Sauerstoff, auch ohne Weiterverarbeitung einen negativen Brechungsindex für Lichtwellen eines großen Frequenzbereichs aufweisen.^[7] Der Kristall besteht aus zwei ineinandergeschachtelten Kristallgittern mit symmetrischen optischen Achsen. Die negative Lichtbrechung tritt aber nur in einem gewissen Winkelbereich des Einfallswinkels auf. In künftigen Experimenten wollen die Forscher weitere vermutete Eigenschaften der negativen Brechung prüfen – wie etwa die Umkehrung des Dopplereffekts und der Tscherenkow-Strahlung.^[8]

2007 stellten Vladimir Shalaev und seine Kollegen von der Purdue-Universität ein Metamaterial mit negativem Brechungsindex für Strahlung im nahen Infrarotbereich vor.^[9]

2007 ist es Physikern um Ulf Leonhardt von der Universität St Andrews unter Verwendung von Metamaterial mit negativem Brechungsindex („linkshändiges Material“) gelungen, den sogenannten Casimir-Effekt umzukehren (reverser Casimir-Effekt, auch Quanten-Levitation genannt). Dies eröffnet die Zukunftsperspektive auf eine (nahezu) reibungslose Nanotechnologie.^{[10] [11]}

Perfekte Linsen

Forscher um Prof. Xiang Zhang an der Uni Berkeley nutzten den in einem 35 Nanometer dünnen Silberfilm an der Grenzfläche zu PMMA auftretenden negativen Brechungsindex, um ein Mikroskop zu bauen, das eine sechsfach höhere Auflösung besitzt als die Wellenlänge des zur Beobachtung verwendeten Lichts.^[12]

In fernerer Zukunft könnte die Herstellung *perfekter Linsen* gelingen, die kleinere Objekte als das Beugungslimit der Optik abbilden können. In der populärwissenschaftlichen Literatur findet man zu diesem Thema immer wieder die Aussage „Würde die Herstellung eines solchen Materials gelingen, könnte man damit Linsen herstellen, deren Auflösungsvermögen weit besser wäre als das von Linsen aus gewöhnlichen optischen Werkstoffen“^[13] (Die Einschränkungen dagegen werden praktisch nie erwähnt: Die Linse muss sich im Nahfeld (für Licht: $<1\ \mu\text{m}$) des Objekts befinden, damit die evaneszente Welle noch nicht zu stark abgeklungen ist. Wenn es je Anwendungen für solche Metamaterialien geben wird, dann wird dies in der Mikroskopie sein. Ein verwandtes Verfahren ist die optische Rasternahfeldmikroskopie, die auf einem ähnlichen Grundprinzip (direkte Auswertung der evaneszenten Welle) beruht).

Literatur

- Michael Bass: *Handbook of Optics Volume 1. Optical Techniques and Design*.: 2. Auflage. McGraw-Hill Professional, 1994, ISBN 007047740X.
- Martin Roß-Meßmer: *Den kleinsten Winkel im Visier*. In: *Innovation*. Nr. 10, 2001, S. 22–23 (PDF-Datei; 705 kB ^[14], abgerufen am 20. Dezember 2009).
- Schott Glass (Hrsg.): *Optical Glass Properties. 2000 (Produktkatalog; Brechungsindizes verschiedener Glassorten; PDF-Datei; 257 kB ^[15]*).

Weblinks

- Stefan Maier: *Forscher: Negativer Brechungsindex existiert* ^[16]. www.wissenschaft.de. 19. März 2003, abgerufen am 20. Dezember 2009 (Negativer Brechungsindex bei Mikrowellen).
- Stefan Maier: *Forscher: Gewöhnlicher Kristall hat negativen Brechungsindex* ^[17]. www.wissenschaft.de. 23. Oktober 2003, abgerufen am 20. Dezember 2009.
- Stefan Maier: *Verkehrte Welt wird (beinahe) sichtbar* ^[18]. www.wissenschaft.de. 23. Juli 2007, abgerufen am 20. Dezember 2009 (Metamaterial mit negativem Brechungsindex im nahen Infrarotbereich).
- C. Wolfseher: *Brechung* ^[5]. Abgerufen am 20. Dezember 2009 (Dynamische Arbeitsblätter mit Geogebra).
- Belle Dumé: *The speed of light is not violated by negative refraction* ^[19]. PhysicsWeb, 20. März 2003, abgerufen am 20. Dezember 2009.
- *RefractiveIndex.INFO – Datenbank für Brechungsindizes* ^[20]. Mikhail Polyanskiy (Hrsg), abgerufen am 20. Dezember 2009.
- *TexLoc Refractive Index of Polymers* ^[21]. (engl.), abgerufen am 27. August 2010

Einzelnachweise

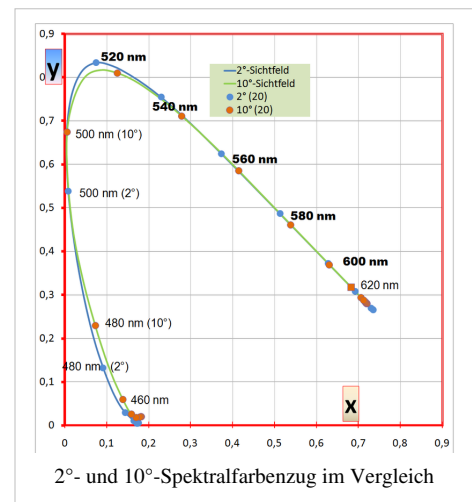
- [1] H. Steffen, H. Mayer: *Optische Eigenschaften dünner Cäsium-Schichten im Wellenlängenbereich von 0,3 bis 0,9 μ und ihr elektrischer Widerstand*. In: *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*. 254, Nr. 3, 1. Mai 1972, S. 250–268, doi: 10.1007/BF01379784 (<http://dx.doi.org/10.1007/BF01379784>).
- [2] David R. Lide (Hrsg.): *CRC Handbook of Chemistry and Physics: A ready-reference book of chemical and physical data*. 90. Aufl., CRC Taylor & Francis, Boca Raton Fla. 2009, ISBN 0-8493-0487-3, S. 3-232.
- [3] IBM beats optical lithography limits (<http://optics.org/optics/Articles.do?channel=technology&type=news&volume=12&issue=2&article=18&page=1>) (Technology News in optics.org vom 22. Februar 2006)
- [4] Stefan Maier: *Photolithographie ist noch lange nicht am Ende* (<http://www.wissenschaft.de/wissen/news/262365.html>). (Newsticker wissenschaft.de vom 28. Februar 2006)
- [5] Glassproperties.com *Berechnung des Brechungsindex von Gläsern* (http://glassproperties.com/refractive_index/) (in englischer Sprache)
- [6] C. Kusko, Z. Zhai, N. Hakim, R. S. Markiewicz, S. Sridhar, D. Colson, V. Viallet-Guillen, A. Forget, Yu. A. Nefyodov, M. R. Trunin, N. N. Kolesnikov, A. Maignan, A. Daignere, A. Erb: *Anomalous microwave conductivity due to collective transport in the pseudogap state of cuprate superconductors*. In: *Physical Review B*. 65, Nr. 13, 6. Februar 2002, S. 132501, doi: 10.1103/PhysRevB.65.132501 (<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.65.132501>).
- [7] *Left Handed Material at Work* (<http://www.aip.org/png/2003/202.htm>). In: *Physics News*. Abgerufen am 20. Dezember 2009 (englisch).
- [8] Yong Zhang, B. Fluegel, A. Mascarenhas: *Total Negative Refraction in Real Crystals for Ballistic Electrons and Light*. In: *Physical Review Letters*. 91, Nr. 15, 9. September 2003, S. 157404, doi: 10.1103/PhysRevLett.91.157404 (<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.91.157404>).
- [9] V. M. Shalaev: *Optical negative-index metamaterials*. In: *Nat. Photonics*. 1, 2007, S. 41–48, doi: 10.1038/nphoton.2006.49 (<http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2006.49>).
- [10] Rainer Scharf: *Bisweilen stößt das Nichts auch ab*. In: *Frankfurter Allgemeine Zeitung*. 11, 14. Januar 2009, S. N1.
- [11] Ulf Leonhardt et al: *Quantum levitation by left-handed metamaterials*. In: *New J. Phys.* 9, 2007, S. 254, doi: 10.1088/1367-2630/9/8/254 (<http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/9/8/254>).
- [12] H. Lee, Y. Xiong, N. Fang, W. Srituravanich, S. Durant, M. Ambati, C. Sun, X. Zhang: *Realization of optical superlens imaging below the diffraction limit*. In: *New J. Phys.* 7, 2005, S. 255, doi: 10.1088/1367-2630/7/1/255 (<http://dx.doi.org/10.1088/1367-2630/7/1/255>) ([http://xlab.me.berkeley.edu/Publications/pdfs/33.Joe Superlens.pdf](http://xlab.me.berkeley.edu/Publications/pdfs/33.Joe%20Superlens.pdf)).
- [13] Victor G. Veselago: *The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ* . In: *Sov. Phys. Usp.* 10, Nr. 4, 1968, S. 509–514, doi: 10.1070/PU1968v010n04ABEH003699 (<http://dx.doi.org/10.1070/PU1968v010n04ABEH003699>).
- [14] [http://www.zeiss.de/C1257173002D0F60/0/D29D239FC359D7F7C125718100478D68/\\$File/Innovation10_22.pdf](http://www.zeiss.de/C1257173002D0F60/0/D29D239FC359D7F7C125718100478D68/$File/Innovation10_22.pdf)
- [15] http://www.physics.ohio-state.edu/~dws/class/880.uf/schott/optic_catalog.pdf
- [16] <http://www.wissenschaft.de/wissen/news/204023>
- [17] <http://www.wissenschaft.de/sixcms/detail.php?id=231304>
- [18] <http://www.wissenschaft.de/wissenschaft/news/276130.html>
- [19] <http://physicsweb.org/articles/news/7/3/12>
- [20] <http://refractiveindex.info>
- [21] http://www.texloc.com/closet/cl_refractiveindex.html

CIE-Normvalenzsystem

Das **CIE-Normvalenzsystem** oder **CIE-Normfarbsystem** wurde von der Internationalen Beleuchtungskommission (*CIE – Commission internationale de l'éclairage*) definiert, um eine Relation zwischen der menschlichen Farbwahrnehmung (Farbe) und den physikalischen Ursachen des Farbreizes (Farbvalenz) herzustellen. Es erfasst die Gesamtheit wahrnehmbarer Farben. Unter Nutzung der Farbraumkoordinaten ist auch die Bezeichnung **Yxy-Farbraum** oder **CIE-Yxy** gebräuchlich, sowie vorrangig im englischsprachigen Bereich auch **Tristimulus-Farbraum**.

Der CIE-Normalbeobachter von 1931 und 1964

Bei dem 1931 entwickelten CIE-Normvalenzsystem (CIE 1931) wurden Messwerte zu Grunde gelegt, die auf einen *Normalbeobachter* bezogen sind. Dieser „gemittelte“ Beobachter blickt auf eine Fläche mit einem Sichtfeld von 2° mittig zur Hauptblickrichtung. Dieses Feld hat etwa die Größe einer 1-Euro-Münze, die man mit ausgestrecktem Arm vor sich hält. Diese Begrenzung wurde aus der Größe der Zone der höchsten Dichte der farbempfindlichen Photorezeptoren im Auge abgeleitet. Die Zapfen liegen auf der Netzhaut konzentriert im Bereich der *besten Farbsichtigkeit*. Das normale Sichtfeld der menschlichen Wahrnehmung ist allerdings größer als dieser 2°-Bereich. 1964 wurde deshalb das System für einen Normalbeobachter mit 10°-Sichtfeld eingeführt. Das CIE(1964)-Farbsystem bezieht sich auf das „Weitwinkel“-Sichtfeld des Menschen, dies ist die Größe eines A4-Blattes in normalem Betrachtungsabstand von 30 cm. Im 10°-Randbereich nimmt die Anzahl der Zapfen pro Fläche schon deutlich ab, die Bezugswerte sind entsprechend andere.



Die Mischungsversuche wurden von David Wright (1928) und John Guild (1931) ausgeführt. Aus den genannten physiologischen Überlegungen hatten sie die 2°-Sichtfläche gewählt. Es wurde ein geteilter Schirm verwendet, auf dessen eine Seite eine bestimmte Farbe projiziert wurde. Auf die andere Seite wurden drei Strahler in den Lichtfarben Rot, Grün und Blau projiziert. Diese überlappten sich und strahlten in jeweils einer Grundfarbe. Die Helligkeit jedes Farbstrahlers war einstellbar, während ihre Farbigkeit durch definierte Filter fest stand. Der Beobachter sollte durch Ändern der Helligkeit der drei Lichtquellen den Farbeindruck nachstellen (Drei-Farben-Theorie). Bei einigen Testfarben wurde keine vollkommene Übereinstimmung erreicht. Für diese Fälle konnte der Beobachter zur Testfarbe noch Licht einer (!) der verwendeten Grundfarben hinzufügen. Dieser Skalenwert wurde für solche Grundfarbe als negativer Wert eingetragen. Mithin das Wegnehmen von Licht auf der Stellseite. Der gesamte Bereich der vom Menschen wahrnehmbaren Farbreize konnte so erfasst werden. Das Farbsehvermögen war numerisch erfasst.

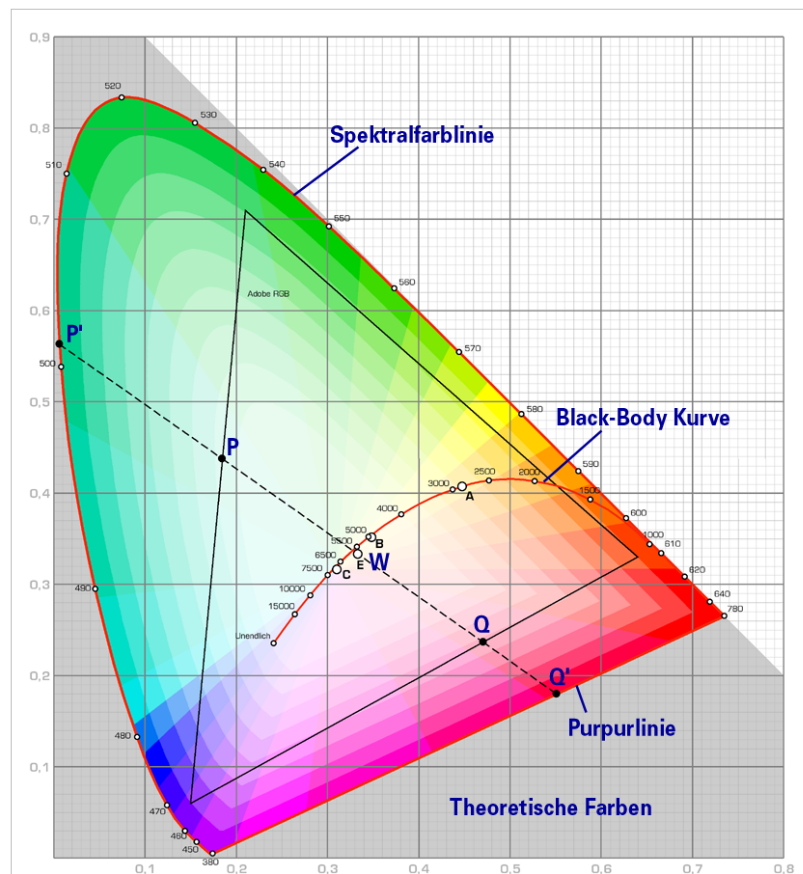
Bis heute ist die *CIE-Normfarbtafel* von 1931 das meistverwendete wahrnehmungsbezogene Farbbeschreibungssystem. Das CIE-System meint auch heute noch das 2°-Sichtfeld-System, sofern nichts anderes angegeben ist. Die Form der Farbvalenz-Fläche in den Normfarbtafeln der beiden Systeme ist geringfügig verschieden.

Tristimulus

Insbesondere im englischsprachigen Bereich werden die drei Grundwerte X, Y und Z als Tristimulus bezeichnet. In dieser Bedeutung sind es drei Anteile der definierten normierten Grundfarben. Jede Farbe lässt sich mit einem solchen Zahlentripel kennzeichnen. Entsprechend ist für das CIE-Normsystem die Bezeichnung Tristimulus-System üblich. Die 1931 gemessenen Kurven heißen auch Tristimuluskurven. Ein Smaragdgrün hat danach die Tristimuluswerte $\{X, Y, Z\} = \{22,7; 39,1; 31,0\}$. Dazu werden für jede Wellenlänge im Abstand von 20 nm, 10 nm, 5 nm oder 1 nm die tabellierten Werte von x,y,z mit der spektralen Energie, die von der Lichtquelle emittiert wird, multipliziert. Diese Werte werden an jeder Wellenlängenposition mit der Remission der Probe multipliziert. Diese Remission wird gegen einen ideal reflektierenden Diffusor gemessen. Üblicherweise handelt es sich dabei um den BaSO_4 -Standard, mitunter auch um einen gegen Gebrauchsspuren beständigeren Polytetrafluorethylen(Teflon)-Standard. Die Remission dieses Diffusors wird an jeder beprobten Wellenlänge auf 100 gesetzt. Letztlich werden die Summen aller drei Wertereihen summiert und durch die Summe der spektralen Energien y dividiert, weil Y als perfektes Weiß nach Definition gleich 100 sein muss. Die CIE-Publication 15.2 von 1986 enthält die entsprechenden Informationen zur XYZ-Farbenskala und zur Funktion des CIE-Normalbeobachters. Bedingt durch die Messtechnik vom Anfang des 20. Jahrhunderts wurden in den Erkenntnisprozess zur Beschreibung des Phänomens Farbe auch die imaginären Farben als Denkkonstruktion eingeführt.

Die Normfarbtafel

Um den vom Betrachter wahrgenommenen dreidimensionalen Farbraum übersichtlicher (nach Farbart) darstellen zu können, wurde die zweidimensionale *CIE-Normfarbtafel* entwickelt. Dabei wird die dritte Komponente Z (im Falle des rechts stehend abgebildeten Diagramms Blau) für jeden Punkt der Farbtafel rechnerisch aus den beiden anderen durch die Beziehung $x + y + z = 1$ ermittelt. Die hufeisenförmige Fläche möglicher Farben ist bei der *CIE-Normfarbtafel* auf einem Koordinatensystem aufgetragen, auf dem x- und y-Anteil (der CIE-genormten theoretischen Grundfarben X (rot), Y (grün) und Z (blau), (siehe CIE XYZ-Farbraum) einer beliebigen Farbe P direkt abgelesen werden können. Durch die Grundbedingung $x + y + z = 1$ lässt sich der z-Anteil jeweils rechnerisch ($z = 1 - x - y$) ermitteln. Die Gesamtheit möglicher Farben (ohne Beachtung der Hell-Dunkel-Varianten) werden durch



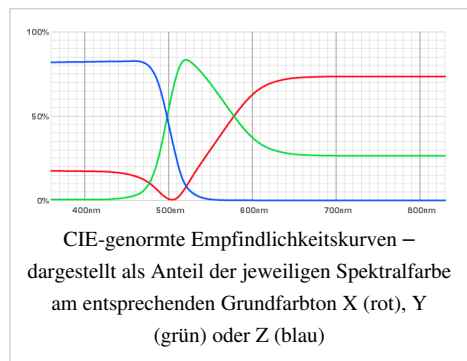
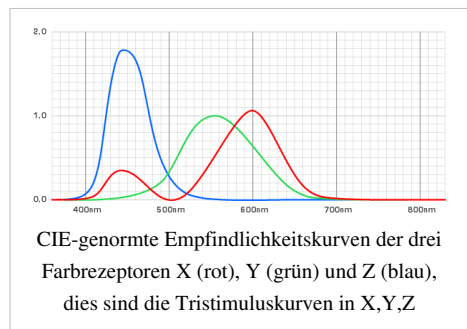
Die CIE-Normfarbtafel. Die Farben der Grafik stellen eine grobe Orientierung innerhalb des Farbraumes dar. Die auf Ausgabegeräten darstellbaren Farben beschränken sich auf eine dreieckige Fläche im Inneren der Grafik. Die Abbildung ist farblich auf das Monitor-Gamut herunter skaliert. Die sattest-möglichen (kräftigsten) Farbtöne befinden sich an den Kanten des Dreiecks.

die das Hufeisen umgrenzende *Spektralfarblinie* (spektral reine Farben) sowie die untere *Purpurlinie* eingefasst.

Zentraler Bezugspunkt der Tafel ist der in jeder Farbmesssituation wesentliche Weißpunkt *W*. Der im Diagramm mit *W* gekennzeichnete Punkt ist derjenige theoretische Weißpunkt, der alle drei Farben zu je $1/3$ (x , y und $z = 0,333...$) repräsentiert. Abhängig von der Beleuchtungssituation kann sich der Weißpunkt praktisch überall innerhalb des Hufeisens befinden. Technisch von Bedeutung ist nur die *Black-Body Kurve*. Auf deren Verlauf sind die Farben als Temperatur eines idealen Strahlers (schwarzer Körper) in Kelvin angegeben. Ausgehend vom Weißpunkt können alle als farbtongleich empfundenen Farben auf einer Linie durch den Punkt *P* abgelesen werden. Über den verwendeten Farbraum hinaus (hier ist der Adobe-RGB Farbraum dargestellt) kann die für die spezielle Situation entsprechende Spektralfarbe auf der Spektralfarblinie (*P'*) abgelesen werden. Auf der genau gegenüberliegenden Seite von *W* können die Komplementärfarben auf der verlängerten Linie *W-Q* abgelesen werden. Der Punkt *Q'* stellt dabei die äußerste (reinste) Komplementärfarbe dar, der in diesem Fall durch den Schnitt mit der Purpurlinie definiert wird.

Exakt definiert wird das CIE-Farbsystem lediglich durch die ursprünglich experimentell ermittelten relativen Empfindlichkeiten der drei Farbrezeptoren des menschlichen Farbwahrnehmungsapparates (der sog. Normalbeobachter) für jede sichtbare Spektralfarbe. Die Empfindlichkeitskurven sind von Person zu Person gewissen Schwankungen unterworfen, als Mittelwerte jedoch als sog. Normalbeobachter (CIE Standard Observer) festgelegt.

Aus der Messung der spektralen Empfindlichkeit der drei menschlichen Zapfen lässt sich nach gleicher Vorlage ein physiologischer Farbraum bestimmen. Die drei Zapfen werden nach ihrem Empfindlichkeitsmaximum als L-, M-, S-Zapfen, für long-middle-short benannt. Der daraus gebildete Farbraum, der ebenfalls alle wahrnehmbaren Farben repräsentiert heißt LMS-Farbraum. Bei entsprechender Normierung lässt sich auch hierfür eine Farbarttafel angeben. Normiert wird durch Division mit der Summe $L+M+S$. So erhält man hierfür die Werte $l = L/(L+M+S)$, $m = M/(L+M+S)$, $s = S/(L+M+S)$, die die Beziehung $l + m + s = 1$ erfüllen.



Das Bauprinzip

Auf dem Rand dieser Fläche (Spektralfarbenzug) befinden sich die „reinen“ Farben, der höchsten Sättigung. Der gerade Rand zwischen Blau (~ 380 nm) und Rot (~ 780 nm) wird als *Purpurgerade* bezeichnet. Auf einem Kurvenzug der *Weißpunkte*, liegen die allerdings von der benutzten Beleuchtung abhängigen Neutralpunkte. Bei Glühlampenlicht (Normlichtart A) sollte ein Weiß anders aussehen als an einem Nordfenster bei bedecktem Himmel (Normlichtart D65, mittleres Tageslicht). Erfahrungen von Fotografen bestätigen dies, andererseits ist die allgemeine Erfahrung auf Grund der Farbumstimmung eine andere. Die Linie aller Weißpunkte ergibt sich aus der Farbe eines Planckschen Strahlers bei verschiedenen Farbtemperaturen von roten, gelben Farborten zu blauen bei 10000 K.

Sättigung

eines Punktes (mithin eines Farbtones) des CIE-Farbraumes wird ermittelt, indem vom Neutralpunkt *W* zum Farbpunkt eine Gerade gelegt wird. Das Verhältnis aus Abstandes Weißpunkt-Farbort (*W-F*) und Abstand Weißpunkt-äußerer Rand (*W-P*) ist das Maß für die Sättigung. Jeder Farbort auf dem Spektralfarbenzug hat somit die Sättigung 1 (entsprechend 100%).

Farbton

wird als bunttongleiche Wellenlänge angegeben: Die Gerade vom Weißpunkt (W) über den Farbart (F) zum Rand des Spektralzuges (P) endet an dieser Wellenlänge. Purpurtöne werden durch die konträre Wellenlänge bei Verlängerung der Geraden über den Weißpunkt hinaus bezeichnet.

Hellbezugswert

Die xy-Farbartebene ist nur die Projektion des zum System gehörenden Farbkörpers nach Rösch. Die notwendige dritte Größe für die Festlegung einer Farbe ist der Hellbezugswert A, dieser ist durch Definition identisch und größengleich mit dem Helligkeitsparameter Y. Daraus resultiert auch die Bezeichnung als Yxy-Farbraum.

Die psychologische und künstlerische Kategorie *Gegenfarbe* (Komplementärfarbe) erreicht man, indem man zum Farbart in der x-y-Menge durch Spiegelung am Weißpunkt W den Farbart der Gegenfarbe ermittelt. Nach dem gleichen Verfahren erhält man deren Sättigung und deren bunttongleichen Wellenlänge.

Metamerie

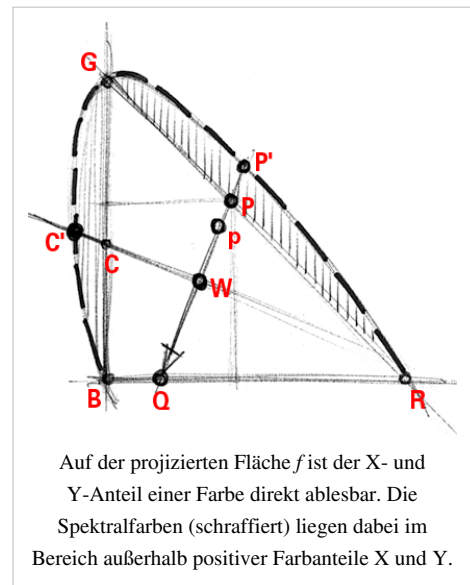
Kunstmalern war schon lange bekannt, dass sich Farben aus drei Komponenten ermischen lassen. Die Theorie hierzu stellten Hermann von Helmholtz und Thomas Young auf:

- jeder Farbeindruck kann aus drei Primärfarbstrahlen (additive Farbmischung) erzielt werden und
- unterschiedliche spektrale Zusammensetzung kann als genau gleich (Metamere) wahrgenommen werden.

Die von Helmholtz und Young aus der praktischen Erfahrung entwickelte Dreifarbentheorie erfordert, dass im menschlichen Auge drei verschiedene Farbrezeptoren vorhanden sind. Diese müssen zudem ein bestimmtes Absorptionsspektrum aufweisen. Für die Wahrnehmung ist dies andererseits die spektrale Empfindlichkeit des Subjektes. Jedes Absorptionsspektrum hat ein Maximum bei einer bestimmten Wellenlänge. Die visuelle Wahrnehmung setzt sich aus drei Komponenten zusammen. So kann jeder wahrnehmbare Farbeindruck aus dem Empfindungsmaximum entsprechenden Spektralfarben ermischt werden. Allgemeiner formulierte Hermann Günther Graßmann in seinem Ersten Graßmannschen Gesetz, dass jede Farbe durch drei (hinreichend unabhängige) Größen eindeutig beschrieben ist. Dies können beispielsweise sein:

- Helligkeit, Farbton und Farbsättigung oder
- Intensität von Rot, Grün und Blau.

Das „Auge“ „klassifiziert“ beliebig „komplexe“ Lichtspektren durch sehr wenige Parameter. Lichter mit unterschiedlichen Spektren (bei geeigneter – eben metamerer – Intensität) erzeugen den gleichen Farbeindruck. Die Farbreihe des fortlaufenden sichtbaren Spektrums von 380 nm bis 780 nm werden auf die Wahrnehmungsgröße der drei Farbvalenzen abgebildet.



Alle wahrnehmbaren Farben können also als Ortsvektoren in einem dreidimensionalen Farbraum dargestellt werden. Die drei Koordinaten eines jeden Punktes im Farbraum sind das Maß der Intensität der Farbkomponenten Rot (R), Grün (G) und Blau (B). Die Länge eines Vektors bestimmt die Gesamtintensität des Lichts, während seine Raumrichtung das Mischungsverhältnis der drei Grundfarben wiedergibt. Lässt man die Intensität außer Acht, so können alle möglichen Farbeindrücke auf einer Dreiecksfläche F im Raum dargestellt werden, auf der für jeden Punkt $R + G + B = 1$ gilt. Projiziert man diese auf die Fläche, die durch die Achsen für Rot und Grün aufgespannt ist, so ergibt sich eine einfache Möglichkeit, die Verhältnisse der drei Farbwerte grafisch darzustellen: Die Rot (= X)- und Grün (= Y)-Komponenten sind direkt ablesbar, während die Blau (= Z)-Komponente gemäß $B = 1 - R - G$ berechenbar ist.

Beim Versuch, alle vorhandenen Valenzen von Spektralfarben auf der so entstandenen Grafik einzutragen (gestrichelte Linie $B-G-R$ – geschnitten mit unserer Linie in P'), fällt – unabhängig vom gewählten Spektralfarbtrio – auf, dass die (reinen) Spektralfarben jeweils *außerhalb* der möglichen Komponenten-Verhältnisse lägen.

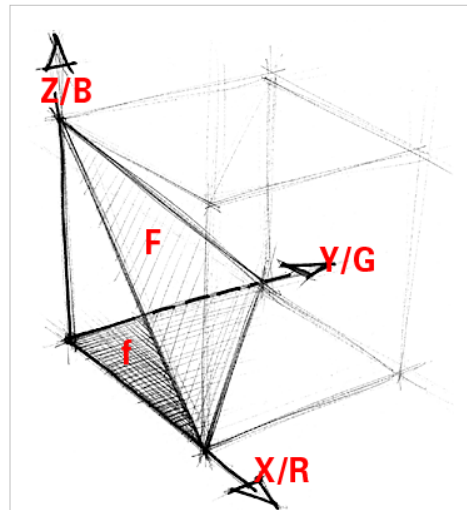
Es ergeben sich *negative* Einstellwerte für fast alle Spektralfarben außer bei den im System definierten Primärfarben. Um aus den drei Primärfarben ein spektrales Cyan (C') zu erzeugen, gilt damit in Farbvalenzen beschrieben:

$$\text{Blau} + \text{Grün} \square \text{spektrales Cyan} + \text{etwas Rot}$$

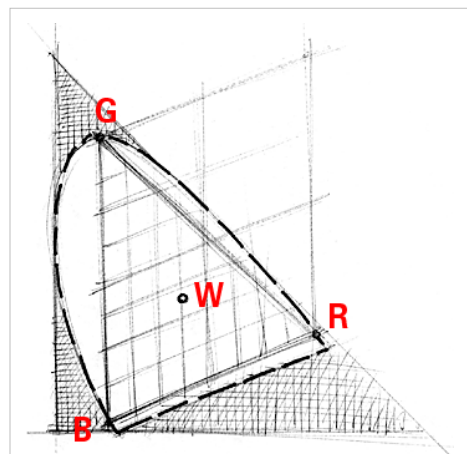
Die Zahlenwerte der Koordinaten, also die absoluten Beträge des Farbortvektors in diesem Farbraum, können mathematisch korrekt umgeformt werden.

$$\text{spektrales Cyan} \square \text{Blau} + \text{Grün} - \text{etwas Rot}$$

Für den praktischen Gebrauch entsteht also die Anforderung, aus dem „blauen“ und dem „grünen“ (in erforderlicher Intensität) etwas „rotes“ Licht wegzulassen, um das gewünschte Cyan zu erhalten. Mit solchen Umformungen ist es möglich, alle Farben in einem (zunächst theoretischen) Farbraum anzuordnen. Dadurch verschiebt sich etwa ein beliebiger RGB-Farbraum einfach ins Innere eines solchen Gesamtfarbraumes.



Auf der Fläche F mit $X + Y + Z = 1$ stellt jeder Punkt ein Verhältnis der Grundfarben X, Y und Z zueinander dar. Die projizierte Fläche f verzichtet auf die Z-Komponente, die sich rekursiv aus X und Y ergibt.



Zur Vermeidung negativer Werte wurden bei der Normfarbtafel theoretisch definierte Grundfarbvalenzen festgelegt, sodass dennoch alle wahrnehmbaren Spektralfarben erfasst sind.

Die Standardbeleuchtung

Das CIE-Normvalenzsystem wurde ursprünglich in Hinsicht auf Beleuchtungsfragen entwickelt. Das System erlaubt prinzipiell jede denkbare Kombination an X-, Y- und Z-Werten. Um eine normierte Übersicht der Farben zu erreichen wurden neutralweiße Normlichtfarben definiert. Aus Gründen der Farbwahrnehmung befinden sich diese auf der Black-Body-Kurve, da dies mit einer Farbtemperatur verbundene Beleuchtungen sind.

Vor der heutigen Entwicklung der Rechentechnik war eine Darstellung der Werte als Tabelle nötig. Um sie vergleichbar zu machen wurden die Intensitätswerte S_λ der Normlichtarten auf $S_{560\text{ nm}} = 100\%$ normiert, weshalb bei farbmtrischen Berechnungen eine geeignete Rückrechnung nötig wird.

CIE-Normbeleuchtungen	x-Wert	y-Wert	Bemerkung
Ausgangsnormlichtarten			
CIE-Normbeleuchtung A	0,4476	0,4074	Lichtspektrum einer genormten Glühlampe, ausgesetzte Norm.
CIE-Normbeleuchtung B	0,3484	0,3516	ausgesetzte Norm für Tageslicht, durch D65 ersetzt. Bei der Definition 1931 wurde das Licht einer Glühlampe durch Vorsetzen einer Kupfersulfatküvette als Tageslicht genormt.
CIE-Normbeleuchtung C	0,3101	0,3162	Weißpunkt der NTSC-TV-Norm, entspricht einem Warmlicht.
CIE-Normbeleuchtung E	1/3	1/3	Weißpunkt des energieglichen Punktes; X = Y = Z mit exakt gleichen Anteilen
neuere auf die Farbtemperatur bezogene Normlichtarten			
D50 \equiv 5 000K	0,3457	0,3585	Weißpunkt für Wide-Gamut-RGB und Color-Match-RGB, Standard für ein Warmlicht
D55 \equiv 5 500K	0,3324	0,3474	Lichtspektrum ähnlich dem von Tageslicht, das Spektrum ist einem schwarzen Strahler bei 5 500 Kelvin ähnlich.
D65 \equiv 6 500K	0,312713	0,329016	Als mittleres Tageslicht entspricht es einem Mittagshimmel am Nordfenster. Das Spektrum ist ähnlich einem Planckschen Strahler bei 6 504 Kelvin. Genutzt wird dieses Normlicht als Weißpunkt für sRGB, Adobe-RGB und die PAL/SECAM-TV-Norm. Die Abweichung kommt durch eine Korrektur der Formel für die Schwarzkörperstrahlung nach der Definition der Normlichtart zustande. Der Faktor c_2 wurde von $1,438 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ auf $1,4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ geändert.
D75 \equiv 7 500K	0,2990	0,3149	Das Spektrum ist dem schwarzen Strahler bei 7 500 Kelvin ähnlich.
D9300	0,2848	0,2932	Weißpunkt für besondere blaue Leuchtdisplays, das Spektrum ist dem schwarzen Körper bei 9 300 Kelvin ähnlich

Umrechnung der Farbräume

Da mit der Aufstellung des CIE-Farbraumes die Wahrnehmungskategorie „Farbe“ zahlenmäßig erfassbar ist, lassen sich Farbvalenzen auch in anderen Farbräumen beispielsweise durch Umrechnung mit entsprechenden Matrizenoperationen beschreiben.

Beispielhaft ist hier die Umrechnung der Koordinaten des RGB-Farbraums in die Tristimuluskoordinaten X, Y, Z angegeben.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

Wenn $(X + Y + Z) = 0$ ist, sind y, x ebenfalls 0. Andernfalls wird normiert mit:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

Siehe auch

- Farbnachstellung

Literatur

- David Falk, Dieter Brill, David Stork: *Seeing the Light*. New York 1986, ISBN 0-471-60385-6 (Kapitel 9: *Color*).
- David Falk, Dieter Brill, David Stork: *Ein Blick ins Licht*. ISBN 3-764-32401-5 (Übersetzung des obigen, nicht mehr im Handel).

Weblinks

- Offizielle Homepage der CIE ^[1]
- Deutsche Lichttechnische Gesellschaft - deutsche Untergruppe der CIE ^[2]
- umfangreiche Datensammlung zu CIE-Daten (herunterladbar) ^[3]
- Applets zur Visualisierung der spektralen Verläufen und umfangreiche Datensammlung ^[4]
- Tabellen zu Farbe und Farbwahrnehmung, Tristimulus-Werte, Chromatizitätswerte ^[5]



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Referenzen

- [1] <http://www.cie.co.at/>
- [2] <http://www.litg.de>
- [3] <http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk>
- [4] <http://www.bruce.lindbloom.com/CIESpectralCalculator.html>
- [5] <http://cvrl.ucl.ac.uk/>

CMYK-Farbmodell

Das **CMYK-Farbmodell** ist ein subtraktives Farbmodell, das die technische Grundlage für den modernen Vierfarbdruck bildet. Die Abkürzung **CMYK** steht für die drei Farbbestandteile *Cyan*, *Magenta*, *Yellow* und den Schwarzanteil *Key* als Farbtiefe. CMYK-Farbräume sind, wie auch RGB-Farbräume, geräteabhängig und benötigen deshalb Farbprofile um Farbtöne exakt zu beschreiben.

Grundlagen

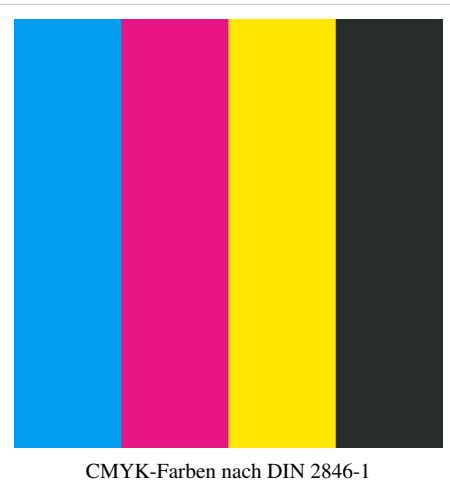
Benennung

Das „K“ in der Abkürzung CMYK rührt weder von *Kontrast* noch *blacK* her; es ersetzt auch nicht den Buchstaben «B», um nicht für Blau/Blue zu stehen. Im englischsprachigen Offsetdruck bezeichnet *K* die *key plate* („Schlüsselplatte“), die schwarz druckende Platte, an deren Grundlinie die drei farbigen Platten ausgerichtet werden.

Im Gegensatz zum RGB-Farbraum, bei dem die Reihenfolge der Buchstaben tatsächlich der Anordnung der Subpixel auf den meisten Computermonitoren entspricht, gibt es für die Buchstabenfolge „CMYK“ keine natürliche Ordnung. Meist wird die alphabetische Reihenfolge für die drei Farbkomponenten bevorzugt. Auch andere Schreibweisen sind verbreitet, wie das umgekehrt alphabetische YMCK. Diese Schreibweise entspricht üblicherweise den Farbelegungen in Vierfarbdruckmaschinen, wenn man sie entlang des Papierlaufes betrachtet: Weißes Papier, darauf wird K, dann C, dann M und zum Schluss Y gedruckt, dann ist das Motiv abgeschlossen^[1]. Grundsätzlich sind zwar alle Schreibweisen möglich, als Industriestandard wird in der grafischen Industrie international meist CMYK verwendet und beugt somit Missverständnissen am ehesten vor.

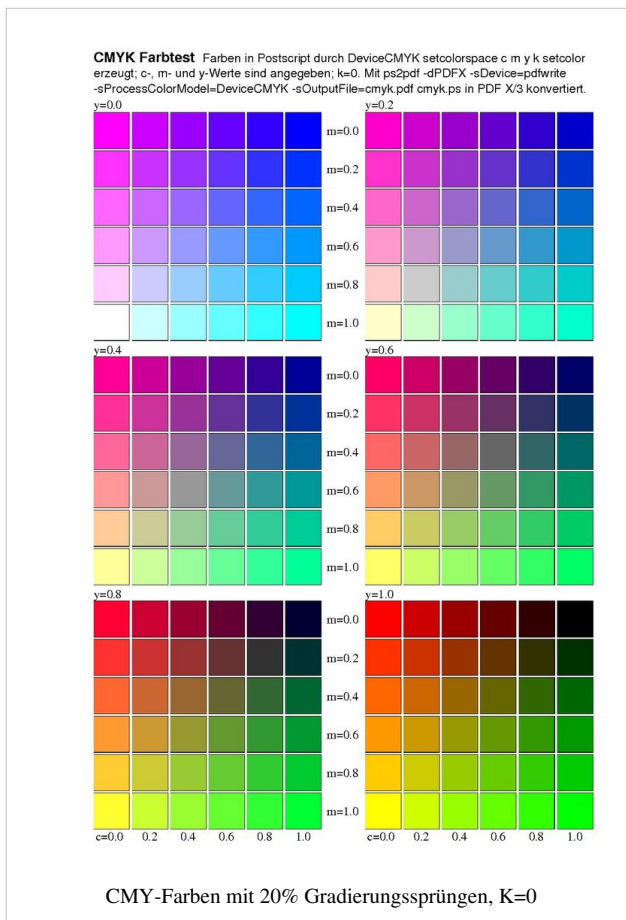
ISO-Skala (Euroskala)

Industrieller Farbdruck mit CMYK-Farben wird Druck nach *Euroskala* genannt, weil er sich farblich an der ehemaligen *Europaskala* orientiert. Diese Bezeichnung wird umgangssprachlich (vor allem in den USA als *Euroscale*) für den europäischen Offsetdruck gebraucht. Die Euroskala ist aber keine korrekte Norm, die korrekte Bezeichnung dafür ist *ISO-Skala*. Die zugehörige Normierung ISO 2846 definiert für Farblieferanten die Eigenschaften dieser Farben. In der ISO 12647-2 ist die Farbwirkung dieser Druckfarben auf unterschiedlichen Druckpapieren beschrieben. Zur praktischen Anwendung dieser Norm existieren ICC-Profile, beispielsweise „ISO Coated sb“ für den Druck auf gestrichenen Papieren.



CMYK-Separation:
Cyan (C), Magenta
(M), Yellow (Y), Black
(K), Cyan + Magenta
(CM),
Cyan+Magenta+Yellow
(CMY), CMYK

Farbtheorie



CMY-Farbraum und CMYK-Farbmodell

Das CMYK-Farbmodell ist ein generatives Farbmodell, d. h. es beschreibt die technischen Mischverhältnisse seiner vier Grundfarben unabhängig davon, *welche* Grundfarben (Farbvalenzen) letztlich verwendet werden. Die möglichen Werte für jede der vier einzelnen Farben liegen zwischen 0 % und 100 %. 0 % steht für unbedruckt und 100 % für eine Volltonfläche.

Um farbtreue Druckergebnisse zu erzeugen, wurden diese mit den ISO-Standards 15929 und 15930 genormt. Dabei hat sich in der europäischen Druckindustrie PDF/X-3 als (Minimal)-Standard durchgesetzt. In Nord-Amerika ist das etwas weniger restriktive, PDF/X-1a-Format Standard. Für farbverbindliche Drucke muss jede einzelne Komponente (z.B. Digicam, Scanner, Monitor, Druckertreiber, Tinte, Papier) profiliert werden.

Auf der nebenstehenden Abbildung sind die CMY-Farben in 20-prozentigen Gradierungssprüngen dargestellt. Die Grafik liegt im PDF/X-3-Format vor.

Man verwendet für das CMYK-Farbmodell vier

genormte Farbtöne, die Prozesscyan, Prozessmagenta, Prozessgelb (auch Eurogelb) und Prozessschwarz genannt werden.

Schwarzaufbau

Die zusätzliche Druckfarbe Schwarz (*Key*), für die das CMYK-Farbmodell entworfen wurde, ist nötig, weil der Zusammendruck der drei Bunttöne (als Grundfarben des CMY-Farbraumes für das subtraktive Farbmodell, das das Verhalten von Licht beschreibt) zwar theoretisch, aber nicht praktisch ein ausreichendes Schwarz ergibt. Für die im Druck verwendbaren Cyan-, Magenta- und Gelb-Pigmente gibt es keine Farbmittel, die die nötigen optischen Eigenschaften einer Optimalfarbe haben. Andererseits ist Schwarz für den Unbuntaufbau eines Bildes unbedingt nötig. Es wird bei der Separation des Bildes bestimmt, um zu vermeiden, dass zu viele Farben übereinander gedruckt werden müssen. Die realen Absorptionseigenschaften von Pigmenten für Druckfarben verhindern, dass eine Mischung mit drei Grundfarben tatsächlich Schwarz, also eine gleichmäßige Auslöschung der Intensitäten ergibt. Das Ergebnis bleibt ein dunkles Braun. In der Praxis nimmt man für ein reines tiefes Schwarz das Pigment Ruß, das meist mit Reflexblau geschönt ist, um den natürlichen Rotstich zu überdecken. Auch zur Verbesserung des Kontrastes in dunklen Bild- oder Zeichnungsteilen wird Schwarz im Vierfarbdruck verwendet. Außerdem lassen sich die farbmetric korrekt Buntfarben technisch nicht effektiv nachstellen, und der Bedruckstoff (meist ein Papier) ist nicht farbmetric neutralweiß.

Anwendung

Drucktechnik

CMYK ist das Standardfarbmodell der Drucktechnik für den Vierfarbdruck – aber auch weitere Schmuckfarben werden in diesem Modell für die Druckendstufe angegeben. Das Farbmanagement innerhalb der digitalen Druckvorbereitung erfolgt über ICC-Farbprofile.

Computertechnik

Auch Tintenstrahldrucker und Tintendrucker arbeiten meist mit CMYK-Farben. Viele Geräte weisen jedoch zusätzlich noch weitere Tinten auf: Durch eine oder mehrere hellere Abstufungen von Magenta und Cyan oder auch durch Grautöne wird das Streuraster des Druckers bei hellen Farbmischungen weniger wahrgenommen. Zusätzliche Tinten in grün, rot, orange und/oder blau erweitern den Farbumfang des Druckers. Auch Farblaserdrucker und die seltenen Farbnadeldrucker arbeiten meist mit CMYK-Farben.

Verschiedene Hersteller bieten außerdem CMYKT- oder YMCKT-Druckerpatronen an. Das «T» steht dabei für *Topcoat*, einen speziellen Lack zum Überziehen des Papiers mit einer besonders lichtbeständigen, glänzenden oder wasserabweisenden Schutzschicht.

Literatur

- Harald Küppers: *Die Farbenlehre der Fernseh-, Foto- und Drucktechnik*. DuMont, Köln 1985.
- Hans Gekeler: *DuMont's Handbuch der Farbe*. DuMont, Köln 1988, ISBN 3-7701-2111-2.

Weblinks

- Color conversion; RGB/CMYK/HSV-Farbrechner (englisch) ^[2]
- Color Conversion Formulas (Umrechnungsformeln) (englisch) ^[3]
- Farbmischer für CMYK- und RGB-Farben ^[4]
- Bradford-Matrizen zur Umrechnung zwischen Farbräumen (englisch) ^[5]

Einzelnachweise

- [1] Helmut S. Teschner: *Offsetdrucktechnik*, 10. Auflage, Seite 19/12, Stichwort Farbreihenfolge, Stuttgart 1997
- [2] <http://web.forret.com/tools/color.asp>
- [3] <http://www.easycmyk.com/math.html>
- [4] <http://www.kurztutorial.info/programme/farbenrechner/cmyk-rgb.htm>
- [5] <http://www.bruceindbloom.com>



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Cyan

Mittleres Cyan,

sRGB #00DDFF

Cyan,

sRGB #00FFFF

Cyan (auch in der Schreibung *Zyan* anzutreffen) bezeichnet allgemein einen am Übergang von Blau zu Grün liegenden Farbton. Der Begriff wird vor allem in technischen und künstlerischen Anwendungen genutzt und ist in der Alltagssprache seltener. Hier fehlt eine allgemein akzeptierte und abgrenzbare Farbkategorie Cyan (im Gegensatz etwa zu dem am Übergang von Rot zu Gelb liegenden Orange). Alltagssprachlich gebräuchlicher ist die Bezeichnung Türkis, jedoch ist der so bezeichnete, zwischen Blau und Grün liegenden Farbton nicht in allen Nuancen mit Cyan deckungsgleich.

Begriff

Präzisere Bedeutung hat der Farbname nur in speziellen Anwendungen, etwa

- als eine farbmetric definierte Farbe, insbesondere
 - als eine Druckfarbe im Vierfarbdruck (*Druck-Cyan*) und
 - als eine für Computeranwendungen spezifizierte Webfarbe (*Web-Cyan*);
- als eine Grundfarbe bei einer auf drei Farben basierenden subtraktiven Farbmischung;
- als eine zwischen Blau und Grün liegende Farbkategorie innerhalb verschiedener Farbsysteme;
- als ein spezieller Blauton (d.h. ein Farbtonunterbereich von Blau), oft auch *Cyan-Blau* genannt, etwa zur Abgrenzung gegenüber Ultramarinblau;
- als eine Modelfarbe in der Textilindustrie.

Im Artikel werden die Bedeutungen näher ausgeführt.

Ordnet man Druck-Cyan und Web-Cyan den farbtongleichen Wellenlängen zu, erhält man den Wellenlängenbereich von 482 nm bis 492 nm. Die in manchen Büchern zu findenden Angaben eines Cyan zugeordneten Spektralbereichs variieren und sind nur im jeweiligen Kontext sinnvoll, beispielhaft dafür 487 nm bis 492 nm Norbert Welsch ^[1] oder 480 nm bis 510 nm bei Franz Wenzel ^[2]).

Etymologie

Das Wort Cyan geht auf griechisch *κυανός* zurück, welches ein tiefes, dunkles Blau bezeichnet (Stahlblau, Schwarzblau) ^[1].

Als neuere Sprachentwicklung ist der Farbbegriff Cyan insbesondere durch die Euroskala und durch modische Designgestaltungen im Deutschen eingeführt. Im RAL-Farbsystem, das in seinen Anfängen in der Mitte des 20. Jahrhunderts entstand, findet sich keine Kategorie Cyan-Farbtöne. Allerdings sind Farbnamen in der Zusammensetzung mit -türkis enthalten. Die Türkisfarben sind in der Kategorie Grün eingegliedert.

Cyan als farbmetrisch definierte Farbe

Bei den nachfolgend aufgeführten Farben handelt es sich um farbmetrisch definierte Farben, ihre Erscheinung ist für bestimmte Beleuchtungs- und Betrachtungsbedingungen eindeutig über Messwerte festgelegt.

Cyan als Grundfarbe im Vierfarbdruck

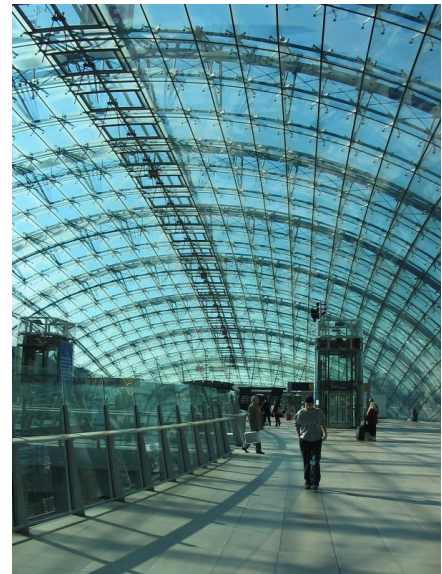
Cyan ist der Name einer nach ISO 2846 und ISO 12647 genormte Druckfarbe des Vierfarbdrucks. Sie wird üblicherweise als **Druck-Cyan** oder **Prozess-Cyan** geführt. Definiert wird die Farberscheinung der gedruckten Farbe bei Tagesnormlicht D50. Das für die physische Druckfarbe geeignete Pigment ist die Beta-Modifikation von Kupferphthalocyanin.

Farbvalenz

Nach ISO 2846-1 hat Druck-Cyan (0°/45° Geometrie) für einen 2°-CIE-Normalbeobachter bei festgelegtem Druckprozess folgende Farbwerte:

Beleuchtung	XYZ (CIEXYZ-Farbwerte)	L*a*b* (CIELAB-Farbwerte/D50)
Normlichtart D50	(16.12, 24.91, 52.33)	(56.99, -39.16, -45.99)
Normlichtart D65	(18.74, 26.62, 68.54)	(58.62, -30.63, -42.75)

Die Farbe liegt auch nach eventueller Anpassung an die Betrachtungsverhältnisse außerhalb des sRGB-Gamuts, kann also auf einem Computermonitor in der Regel nicht dargestellt werden. Es kann nur versucht werden, die Erscheinung der Farbe möglichst gut auf dem Bildschirm anzunähern.



Bahnhof Frankfurt Flughafen

Darstellung der Farbe in sRGB

Druck-Cyan, sRGB #00B7EB

Verschiedene Visualisierungen von Druck-Cyan in sRGB (etwa als Farbmuster auf weißem Hintergrund) sind zu finden, etwa

Hexadezimal-Triplet	HSV-Farbtönwinkel	Quelle
#00B7EB	H=193°	[3]
#00ADEE	H=196°	[4]
#0D8BB1	H=194°	CIECAM02 (s.u.)

Benutzt man das Farbmodell CIECAM02, kann durch Chroma-Reduktion ein Gamut-Mapping auf sRGB realisiert werden, das den empfundenen Farbtön optimal angepasst ist. Bei Benutzung der Software LittleCMS mit den Parametern

- Source: (c.whitePoint = (85.30, 88.77, 67.90) (Papier); c.surround = AVG_SURROUND; c.D_value = 1; c.La = 318; c.Yb = 20),
- Target: (c.whitePoint = (95.04, 100.00, 108.90); c.surround = DIM_SURROUND; c.D_value = 0; c.La = 16; c.Yb = 20)

ergibt sich bei iterativer Chroma-Reduktion die sRGB-Farbe mit Hexadezimal-Triplet #0D8BB1.

Farbtongleiche Spektralfarbe

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, der farbmetrisch definierten Farbe Druck-Cyan eine farbtongleiche Spektralfarbe zuzuordnen. Die Zuordnung im Farbmodell CIECAM02 durch Erhöhung der Chroma ergibt eine Wellenlänge von 482 nm. Eine Zuordnung durch Subtraktion von Weiß D50 innerhalb eines physikalischen Farbraums ergibt eine Wellenlänge von 486 nm.

Cyan als Webfarbe

Webfarbe Cyan, sRGB #00FFFF

Für das Design von Web-Seiten existiert in HTML4/CSS/SVG eine Normierung von englischen Farbbezeichnungen für definierte Webfarben ^[5] ^[6]. Die Farbnamen *Cyan* und *Aqua* stehen beide für die Webfarbe mit sRGB-Hexadezimal-Triplet #00FFFF, also die additive Mischung von Blau und Grün innerhalb des sRGB-Farbraums mit jeweils maximal möglichem Anteil. Dies entspricht dem HSV-Farbtönwinkel H=180°.

Gerade im Internet haben die Norm-Farbnamen eine derart dominierende Stellung, dass viele, auch nicht-technische Autoren mit *Cyan* die *Webfarbe Cyan* meinen. Um Missverständnissen vorzubeugen sind die Bezeichnungen *Web-Cyan* bzw. *Computer-Cyan* bei unklarem Kontext vorzuziehen ^[7].

Farbvalenz

Die direkte Umrechnung der sRGB-Farbwerte mittels der in der Spezifikation von sRGB gegebenen Formeln ergibt die Tristimulus-Werte der Farbe, die man als an D65 adaptierte relative Farbe ansehen kann. Eine chromatische Adaption nach Bradford liefert diese Werte unter Adaption an D50.

Adaptiertes Weiß	XYZ (CIEXYZ-Farbwerte)	L*a*b* (CIELAB-Farbwerte/D50)
Normlichtart D50	(52.81, 77.74, 81.11)	(90.65, -50.63, -15.00)
Normlichtart D65	(53.80, 78.73, 106.95)	(91.11, -50.06, -33.41)

Durch Verwendung von CIECAM02 (zur Vergleichbarkeit mit den gleichen Parametern wie oben) erhält man folgende Tristimulus-Werte, die die theoretische Erscheinung von Web-Cyan als gedruckte Farbe auf weißem Papier beschreiben:

Beleuchtung	XYZ (CIEXYZ-Farbwerte)	L*a*b* (CIELAB-Farbwerte/D50)
Normlichtart D50	(45.93, 73.48, 77.13)	(88.67, -60.70, -15.10)

Farbtongleiche Spektralfarbe

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, der farbmetrisch definierten Farbe Web-Cyan eine Farbton-ähnliche Spektralfarbe zuzuordnen. Die Zuordnung im Farbmodell CIECAM02 durch Erhöhung der Chroma ergibt eine Wellenlänge von 490 nm ^[8]. Eine Zuordnung durch Subtraktion von Weiß D65 innerhalb eines physikalischen Farbraums ergibt eine Wellenlänge von 492 nm (491 nm in ^[9]).

Cyan in der Farbenlehre

Bei der Farbmischung

In einem additiven Farbraum mit den Grundfarben Rot, Grün, Blau (RGB-Farbraum) bezeichnet Cyan die Sekundärfarbe, die aus der additiven Mischung von Grün und Blau entsteht.

In einem subtraktiven Farbraum mit drei Grundfarben bei großem angestrebten Gamut tragen diese Primärfarben meist die Namen Cyan, Magenta und Gelb (CMY-Farbmodell).

Als Komplementärfarbe

In verschiedenen Farblehren ist Cyan die Komplementärfarbe zu Rot.

Cyan als Farbkategorie und relativer Farbtonbereich

In vielen Farbeinteilungen und Farbsystemen wird Cyan als kontrastierender Farbname eingesetzt, wobei oft auf eine farbmetrische Definition des Farbtonbereichs verzichtet wird. Welche Farbtöne Cyan damit umfassen soll, ist nur durch den Vergleich mit den umgebenden Farbkategorien ungefähr zu erschließen.

Es sind unter anderem folgende Farbeinteilungen (eingeschränkt auf Blau- und Grüntöne) zu finden:

- Blau, Cyan, Grün (sowohl in der additiven wie subtraktiven Farbmischung mit drei Grundfarben als Liste aller Primär- und Sekundärfarben)
- Blau, Grünlichblau, Cyan, Bläulichgrün, Grün bei Welsch ^[1] dort mit tatsächlicher Angabe von farbtongleichen Wellenlängenbereichen.
- Indigo, Cyan(blau), Grün in der Farblehre von Helmholtz ^[10]
- Violettblau, Cyan, Grün bei Harald Küppers)
- Violettblau, Ultramarinblau, Cyanblau, Grün in der Farblehre von Newton ^[11] ^[12]

- Ultramarinblau, Cyanblau, Blaugrün, Gelbgrün widergespiegelt sich in der Farbauswahl des 12-teiligen Deckfarbkastens.

Verwandte Farbnamen

gemittelttes "Türkis",
sRGB #39CDBF^[13]

gemittelttes "Cyan",
sRGB #45BFD6^[14]

Verwandte, die Helligkeit nicht einschränkende Farbnamen sind etwa Türkis, Aquamarin, Blaugrün und Grünblau.

Es ergibt sich folgendes Bild der Verwendung:

- Wenn der Name kontrastierend eingesetzt wird, bezeichnet Cyan im Deutschen in der Regel einen bläulichen Farbton als Türkis, Aquamarin und Blaugrün^{[15] [16] [1]}.
- Die Bezeichnung Grünblau wird eher selten eingesetzt^[14].

Webfarbe Teal,
sRGB #008080

Cyan mit Weißanteil,
sRGB #80EEFF

Für helle Farbvarianten und Pastellfarben aus dem Cyan-Farbtonbereich 482 nm bis 492 nm sind die Farbnamen *Hellblau*, *Himmelblau* und - besonders im Textilbereich - *Aqua* zu finden.

Für dunkle Farbvarianten aus dem Cyan-Farbtonbereich 490 nm bis 500 nm sind die Farbnamen *Blaugrün* oder *Seegrün* üblich, neuerdings auch die englischen Bezeichnungen *Petrol* (Modebereich) und *Teal* (Webfarbe). Teal ist der genormte Name für die Webfarbe, die aus Web-Cyan durch Verringerung der Helligkeit entsteht (sRGB-Hexadezimal-Triplet #008080). Im Englischen bedeutet Teal auch *Krickente*, und der Farbname ist wohl von der Farbe der Augenpartie der Krickente abgeleitet.

Klassifikation als Blau oder Grün

Cyan befindet sich an der Grenze zwischen Blau und Grün, wobei das Web-Cyan grünlicher ist als das Druck-Cyan. Da Cyan keine allgemein gebräuchliche Farbkategorie ist, werden die entsprechenden Farben im Alltag den Farbkategorien Blau und Grün (eventuell auch Türkis) zugeordnet.

Vorkommen und Verwendung der Farbe

In der Natur

Cyan kommt in der Natur aufgrund bestimmter Lichtbrechungen als Himmel-, Wasser- und Eisfarbe vor^[1].

Im Alltag

- Ein mittleres Cyan wird gerne als Beckenfarbe in Schwimmbädern eingesetzt, die gesehene *Wasser*-Farbe.
- In der Mode ist ein helles mittleres Cyan für leichte Damenoberteile beliebt (*Aqua*).



Hallenbad in Rom

Farbpsychologie

In der Farbpsychologie steht Cyan für Klarheit und geistige Offenheit, aber auch Kühle und Distanziertheit ^[1]

Einzelnachweise

- [1] Norbert Welsch, Claus Chr. Liebmann: *Farben. Natur - Technik - Kunst*. 2. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, München 2004. ISBN: 3827415632. S.78
- [2] Franz Wenzel: *AGFA-Lichtfilter*. fotokino-verlag, Halle 1957
- [3] Englische Wikipedia: <http://en.wikipedia.org/wiki/Cyan>. Quelle nicht zu verifizieren.
- [4] Farbmuster auf der Homepage von <http://www.tintbook.com/>
- [5] Englische Wikipedia: http://en.wikipedia.org/wiki/Web_colors#X11_color_names
- [6] <http://www.w3.org/TR/css3-color/#svg-color>
- [7] Im Englischen erfolgt für diesen Fall die Nutzung von *Electric Cyan*
- [8] <http://www.magnetkern.de/spektrum.html>
- [9] <http://www.magnetkern.de/spektrum.html>
- [10] Hermann von Helmholtz (<http://www.colorsystem.com/grundlagen/aad.htm>)
- [11] Isaac Newton (<http://www.colorsystem.com/grundlagen/aad.htm>)
- [12] Ernst Wilhelm von Brücke (http://books.google.com/books?id=Iy87NkjmyhUC&pg=PA18&dq=preuÄllisch+blau+ultramarin&as_brr=3&hl=de#v=onepage&q=&f=false)
- [13] Statistische Untersuchung bei freier Vergabe von Farbnamen: <http://www.freimann.eu/domains/farbnamen.ch/statistik/>, 29. Juli 2009
- [14] Statistische Untersuchung bei freier Vergabe von Farbnamen: <http://www.freimann.eu/domains/farbnamen.ch/statistik/>, 29. Juli 2009
- [15] Statistische Untersuchung bei freier Vergabe von Farbnamen: (<http://www.freimann.eu/domains/farbnamen.ch/statistik/>)
- [16] Bezeichnungen eines Farbenherstellers: (http://www.staedtler.de/karat_aquarell_farbbezeichnungen.Staedtler)

Literatur

- Mark D. Fairchild: *Color Appearance Models*. Wiley & Sons, 2004. ISBN: 0470012161.
- Mark D. Fairchild: *A Revision of CIECAM97s for Practical Applications*. Color Res Appl, Vol. 26. <http://www.cis.rit.edu/fairchild/PDFs/PAP10.pdf>
- R. W. G. Hunt: *The Reproduction of Colour*. Wiley & Sons, 6. Auflage, 2004. ISBN: 0470024259.
- Roy S. Berns: *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology*. Wiley & Sons, 3. Auflage, 2000. ISBN: 047119459X.
- Dietmar Schuth: *Die Farbe Blau: Versuch einer Charakteristik*. Universität Heidelberg, Dissertation, 1995. <http://books.google.com/books?id=-j4g1Iuh5WgC>.

Weblinks

- Bruce Lindbloom (<http://brucelindbloom.com/>) Webpräsenz mit vielen farbmtrischen Umrechnungsformeln und online Rechnern.
- Gernot Hoffmann (<http://www.fho-emden.de/~hoffmann/howww41a.html>) Dokumente zu verschiedenen Themen der Farbwissenschaft.



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**:

Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanaals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

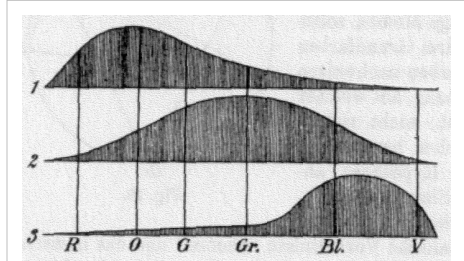
hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Dreifarbentheorie

Die **Dreifarbentheorie** oder **Trichromatische Theorie** ist eine historische Theorie zur Farbwahrnehmung im menschlichen Auge. Sie wurde um 1850 maßgeblich von Hermann von Helmholtz, auf Basis einer älteren Theorie von Thomas Young entwickelt.

Zum aktuellen Kenntnisstand der Physiologie siehe den Artikel Farbwahrnehmung.

Helmholtz hatte beobachtet, dass man aus farbigem Licht dreier *Primärfarben* jede beliebige andere Farbe mischen kann. (Dies ist auch heute noch das Funktionsprinzip aller Farbfernsehbildschirme und Farbmonitore.) Analog dazu vermutete er, dass es auch im Auge drei Typen von Rezeptoren gibt. Sie reagieren unterschiedlich empfindlich auf Licht verschiedener Wellenlängen. Grau und Weiß werden wahrgenommen, wenn alle drei Rezeptorentypen gleich stark angeregt werden. Schwarz wird wahrgenommen, wenn keiner der Rezeptorentypen stimuliert wird.



Die von Thomas Young und Hermann Helmholtz im Auge vermuteten drei Arten von Nervenfasern, deren Reizung die Empfindungen Rot, Grün und Violett hervorrufen.^[1]

Tatsächlich gelang Ende des 19. Jahrhunderts der Nachweis von drei verschiedenen Farbsinneszellen in der Netzhaut. Auch die Farbenfehlsichtigkeit, die entsteht, wenn eine der drei Zellarten genetisch bedingt fehlt, fügt sich gut in die trichromatische Theorie. Andere Phänomene ließen sich besser durch die Gegenfarbtheorie erklären. Der Theoriestreit war für die Physiologie sehr befruchtend; zahlreiche Wissenschaftler des 19. Jahrhunderts äußerten sich zur Farbwahrnehmung.

Hermann Graßmann formulierte diesen Umstand in seinem ersten Gesetz.

Weblinks

- Bruce MacEvoy: *Trichromatic mixtures*. In: *Handprint. Color Vision. Light and the eye* ^[2]. – handprint.com (englisch)

Einzelnachweise

[1] Hermann Helmholtz: *Gesammelte Schriften* III.2, Olms-Weidmann, 2003, Fig. 21

[2] <http://handprint.com/HP/WCL/color1.html#trichrommix>

Elektromagnetische Welle

Als **elektromagnetische Welle** bezeichnet man eine Welle aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern. Dazu gehören Radiowellen, Licht und Gammastrahlung. Die Wechselwirkung elektromagnetischer Wellen mit Materie hängt von ihrer Frequenz ab, die über viele Größenordnungen variieren kann. Entsprechend unterscheiden sich die Quellen, Ausbreitungseigenschaften und Wirkungen der Strahlung in den verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums.

Anders als zum Beispiel Schallwellen, benötigen elektromagnetische Wellen *kein* Medium, um sich auszubreiten.^[1] Sie pflanzen sich im Vakuum unabhängig von ihrer Frequenz mit Lichtgeschwindigkeit fort.

Als Transversalwellen zeigen elektromagnetische Wellen das Phänomen der Polarisation. Im freien Raum stehen die Vektoren des elektrischen und des magnetischen Feldes senkrecht aufeinander und auf der Ausbreitungsrichtung.

Elektromagnetische Wellen verhalten sich immer auch wie Teilchen (siehe Welle-Teilchen-Dualismus). Diese nennt man Photonen. Welches Verhalten bei einem Experiment mehr in den Vordergrund tritt, hängt davon ab, ob die Wellenlänge größer oder kleiner als die „charakteristische Ausdehnung“ (etwa eine Spaltbreite oder der Wirkungsquerschnitt oder die Ortsunschärfe beteiligter Teilchen) des Versuches ist.

Eigenschaften

Wellencharakter

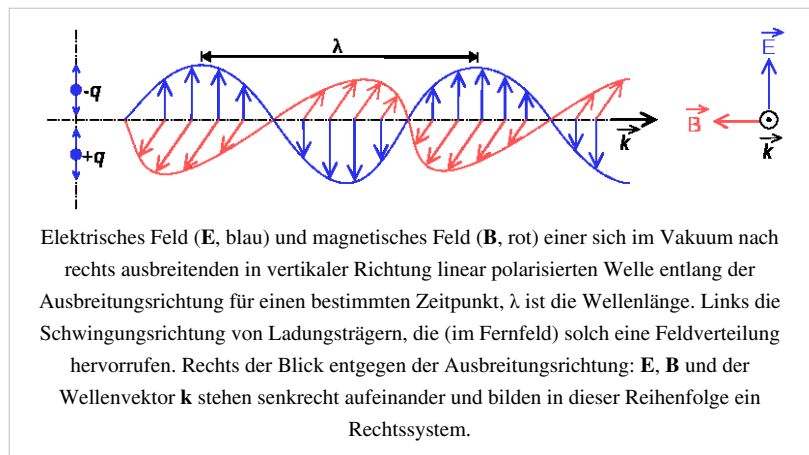
Physikalisch betrachtet handelt es sich bei elektromagnetischen Wellen um sich ausbreitende Schwingungen des elektromagnetischen Feldes. Hierbei stehen elektrisches und magnetisches Feld bei linear polarisierten Wellen senkrecht aufeinander und haben ein festes Größenverhältnis. Dieses ist

gerade durch die Wellenimpedanz gegeben. Insbesondere verschwinden elektrisches und magnetisches Feld an denselben Orten zur selben Zeit, so dass die häufig gelesene Darstellung, dass sich elektrische und magnetische Energie zyklisch ineinander umwandeln, im Fernfeld *nicht* richtig ist. Sie stimmt allerdings zum Beispiel für das Nahfeld eines elektromagnetischen Wellen erzeugenden elektrischen Dipols oder Schwingkreises.

Die Entstehung elektromagnetischer Wellen erklärt sich aus den maxwellschen Gleichungen: Die zeitliche Änderung des elektrischen Feldes ist stets mit einer räumlichen Änderung des magnetischen Feldes verknüpft. Ebenso ist wiederum die zeitliche Änderung des magnetischen Feldes mit einer räumlichen Änderung des elektrischen Feldes verknüpft. Für periodisch (insbesondere sinusförmig) wechselnde Felder ergeben diese Effekte zusammen eine fortschreitende Welle.

Beispiele für Experimente, in denen der Wellencharakter zum Tragen kommt:

- Erscheinungen wie Kohärenz und Interferenz lassen sich nur mit dem Wellenmodell erklären, weil die Mindestabmessungen der entsprechenden Versuche deutlich größer sind als die Wellenlänge des Lichts.
- Man könnte die von Rundfunksendern emittierte Strahlung als sehr große Anzahl von Photonen betrachten. Es gibt allerdings kein Messgerät, das derart energiearme Photonen einzeln nachweisen könnte. Es ist auch deshalb nicht zielführend, hier das Teilchenmodell zur Erklärung von Effekten heranzuziehen. Da die Antennen etwa die Größe der Wellenlänge haben, muss man für alle physikalischen Erklärungen die Welleneigenschaft der Strahlung betrachten.



Teilchencharakter

Für bestimmte Eigenschaften elektromagnetischer Wellen (z. B. Photoelektrischer Effekt), genügt das oben beschriebene Wellenmodell nicht mehr, um alle beobachtbaren Phänomene zu beschreiben, vielmehr treten die Teilcheneigenschaften einzelner Photonen, der Quanten des elektromagnetischen Feldes, in den Vordergrund. Der Wellencharakter (etwa Interferenz) bleibt aber voll erhalten. Man spricht deshalb vom Dualismus von Teilchen und Welle.

Im Rahmen dieser Teilchenvorstellung des Lichtes wird jeder Frequenz f die Energie eines einzelnen Photons $h \cdot f$ zugeordnet, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum ist. Andererseits haben auch Teilchen, wie zum Beispiel über mehrere Atome hinweg bewegte Elektronen, Welleneigenschaften (siehe auch Elektrischer Strom). Beide Aspekte elektromagnetischer Wellen werden theoretisch im Rahmen der Quantenelektrodynamik erörtert. *Beispiele für Wirkungen, in denen der Teilchencharakter zum Tragen kommt:*

- Beim Compton-Effekt trifft eine elektromagnetische Welle mit etwa 20 pm Wellenlänge auf ein Elektron, dessen Wirkungsquerschnitt um etwa drei Größenordnungen kleiner ist. Zur Erklärung des physikalischen Ablaufes der Wechselwirkung muss also der Teilchencharakter des Lichts herangezogen werden. Jeder Versuch, die beobachtete Änderung der Wellenlänge mit dem Wellenmodell zu erklären, scheitert.
- Beim photoelektrischen Effekt ist das Verhältnis der Wellenlänge zum Wirkungsquerschnitt eines Elektrons noch größer. Also kann auch hier das Wellenmodell nichts zur Erklärung beitragen. Im Gegenteil – es führt zu offensichtlichen Widersprüchen.
- Die Erzeugung von Laserlicht beruht auf den Eigenschaften einzelner Atome, die jeweils erheblich kleiner sind als die erzeugte Wellenlänge. Deshalb muss man für die Erklärung der Herstellung auf das Photonenmodell zurückgreifen.

Photonen mit genügender Energie (etwa von einigen Elektronvolt aufwärts) wirken auf Materie ionisierend und können chemische (*photochemische*) Wirkungen auslösen, wenn die Bindungsenergien überschritten werden (Fotochemie). Diese chemische Wirksamkeit wird gelegentlich als Aktinität bezeichnet.

Wellen im Medium

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit c_{med} in einem Medium ist geringer als im Vakuum. Sie hängt von der Permittivität ϵ und der Permeabilität μ des Stoffes ab:

$$c_{\text{med}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$$

Dadurch wirkt sie, abhängig von der Frequenz der Welle (Dispersion), sowie (je nach Medium und abhängig von ihrer Polarisierung und ihrer Ausbreitungsrichtung) den Strahl brechend und zwar immer zum Einfallslot hin. Anders dagegen im Elektronen/Ionen-Plasma der Ionosphäre, das als „optisch dünneres“ Medium wirkt und deshalb den Strahl vom Einfallslot weg bricht, wodurch Totalreflexion möglich wird.^[2]

Eine direkte Krafteinwirkung (z. B. Richtungsänderung) auf eine sich ausbreitende elektromagnetische Welle kann nur durch das Ausbreitungsmedium (Begrenzungen wie Spiegel eingeschlossen) oder die Gravitationskraft erfolgen.

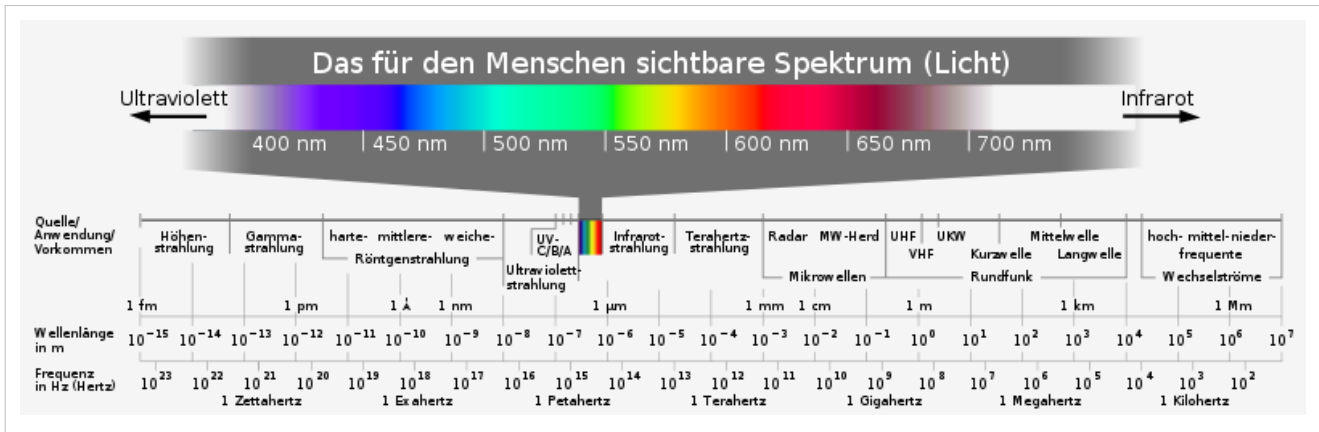
Spektrum

Elektromagnetische Wellen sind im elektromagnetischen Spektrum nach der Wellenlänge sortiert. Eine Liste von Frequenzen und Beispiele elektromagnetischer Wellen gibt es im entsprechenden Artikel.

Das am besten bekannte und am meisten studierte Beispiel einer elektromagnetischen Welle ist das sichtbare Licht. Es stellt nur einen winzigen Teil des gesamten Spektrums dar und ist, mit Ausnahme der Infrarotstrahlung (Wärme), der einzige Bereich, der von Menschen ohne technische Hilfsmittel wahrgenommen werden kann. Bei niedrigeren Frequenzen ist die Energie der Photonen zu gering, um chemische Prozesse auslösen zu können. Bei höheren Frequenzen hingegen beginnt der Bereich der ionisierenden Strahlung (Radioaktivität), bei der ein einziges Photon

Moleküle zerstören kann. Dieser Effekt tritt bereits bei Ultraviolett-Strahlung auf und ist für die Bildung von Hautkrebs bei übermäßiger Sonnenexposition verantwortlich.

Beim Licht bestimmt die Frequenz die Farbe des Lichtes und nicht, wie oft fälschlicherweise angenommen, die Wellenlänge. Deutlich wird dies, wenn man Licht in optisch dichteren Medien beobachtet, wo es sich mit einer geringeren Geschwindigkeit als c ausbreitet. Die Frequenz wird beim Übergang in optisch dichtere Medien nicht beeinflusst und folglich muss es laut $c = \lambda \cdot f$ eine kürzere Wellenlänge haben. Da sich die Farbe aber im Medium nicht ändert, ist also nur die Frequenz charakteristisch für die Farbe des Lichts. In Spektren wird aus historischen Gründen jedoch immer noch die Wellenlänge als charakteristische Eigenschaft für Licht angegeben. Dieser Zusammenhang zwischen Farbe und Wellenlänge gilt dann aber nur im Vakuum (und in guter Näherung in Luft). Monochromatisches Licht, also Licht nur einer einzigen Wellenlänge, hat stets eine Spektralfarbe.

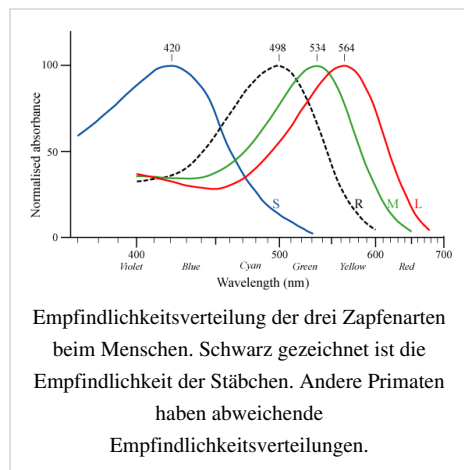


Biologische und chemische Wirkung

Kleine Mengen Photonen mit einer Frequenz unterhalb von $4 \cdot 10^{14}$ Hz (Wellenlänge über $0,7 \mu\text{m}$ und Energie unter $1,7 \text{ eV}$; im oberen Bild rechts vom sichtbaren Licht, also Mikrowellen und Rundfunkwellen) können keine chemischen Reaktionen an Molekülen bewirken, die bei Zimmertemperatur stabil sind. Damit kann man nur Wasserstoffbrückenbindungen beeinflussen, die deutlich schwächer als die Bindungskräfte *innerhalb* eines Moleküls sind und wegen der ständigen Bewegung der Atome nur Bruchteile einer Sekunde bestehen bleiben.

Das Molekül des Fotorezeptors Rhodopsin benötigt je nach Bauart mindestens ein Photon der Wellenlänge 700 nm oder kürzer, um mit einer Konformationsänderung zu reagieren, die dann vom Nervensystem weiter verarbeitet wird. Diese notwendige Wellenlänge kann durch Modifikationen der Molekülbauform geändert werden, wie im Bild rechts zu sehen ist. Die Mindestenergie der Photonen ist auch der Grund, wieso kein Lebewesen existiert, das Infrarot durch Nachweis von *Einzel*photonen sehen kann. Entsprechend können Lebewesen ohne technische Hilfsmittel auch nicht auf Radiowellen geringer Intensität reagieren. Sehr starke Strahlung dieser großen Wellenlänge wirkt aber erwärmend, weil sie durch das Gewebe absorbiert wird.

Erreicht oder übersteigt die Energie von Photonen die Bindungsenergie eines Moleküls, kann jedes Photon ein Molekül zerstören und es können biologische Wirkungen wie beispielsweise eine beschleunigte Alterung der Haut oder Hautkrebs auftreten. Chemische Bindungsenergien stabiler Moleküle liegen oberhalb von etwa 3 eV pro Bindung, deshalb müssen Photonen mindestens diese Energie besitzen, soll es zu Moleküländerungen kommen.



Photonen von Röntgenstrahlung und Gammastrahlung besitzen so viel Energie, dass jedes davon viele Moleküle zerstören kann. Das bezeichnet man als Ionisierende Strahlung.

Abgrenzung

Sehr viele Photonen mit Frequenzen unterhalb von 10^{14} Hz, beispielsweise im Mikrowellenherd bewirken einen allgemeinen Energieeintrag und damit eine Erhöhung der Temperatur. Diese kann – wie jede anders verursachte Überhitzung auch – die Struktur biologischer Moleküle ändern. Das hat mit den Eigenschaften von Photonen nichts zu tun.

Das empfindliche Grubenorgan gewisser Schlangen reagiert *nicht* auf einzelne Photonen wie die Zellen der Netzhaut, sondern auf die Temperaturerhöhung, die durch die Gesamtenergie aller auftreffenden Photonen eingebracht wird

Lichtgeschwindigkeit und spezielle Relativitätstheorie

Wie schnell sich Licht ungefähr ausbreitet, war seit 1676 bekannt. Allerdings fehlte bis 1865 jeder Zusammenhang zu anderen physikalischen Erscheinungen. Diesen konnte damals James Clerk Maxwell herstellen, der aus gewissen mathematischen Beziehungen seiner Maxwellgleichungen die Existenz elektromagnetischer Wellen vorhersagte. Deren Geschwindigkeit stimmte mit der damals bereits gut bekannten Lichtgeschwindigkeit so gut überein, dass sofort ein Zusammenhang hergestellt wurde. Diese Wellen konnte Heinrich Hertz in den 1880er-Jahren experimentell nachweisen.

In der klassischen Mechanik werden Wellen durch die Wellengleichung

$$\frac{\partial^2 \vec{f}}{\partial t^2} = v_{\text{ph}}^2 \Delta \vec{f}$$

beschrieben. Hierbei bezeichnet \vec{f} die Auslenkung der Welle und v_{ph} ihre Phasengeschwindigkeit, die hier als Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle interpretiert werden kann.

Aus den Maxwellgleichungen lässt sich nun im Vakuum für die elektrische Feldstärke \vec{E} die Beziehung

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \Delta \vec{E}$$

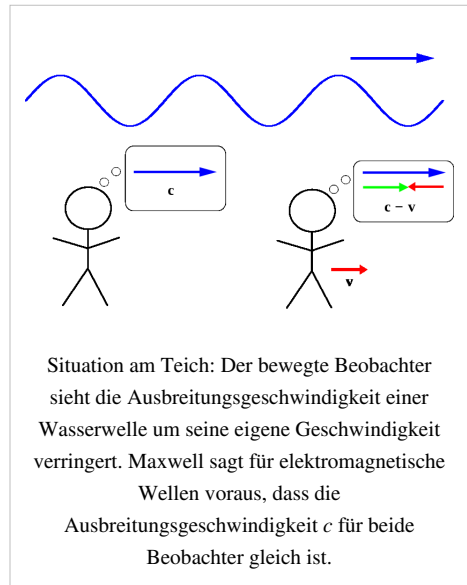
herleiten (in SI-Einheiten; siehe Abschnitt Mathematische Beschreibung). Die elektrische Feldstärke verhält sich in dieser Beziehung also wie eine Welle; die Größe

$$c := \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

tritt als Ausbreitungsgeschwindigkeit auf. Diese Geschwindigkeit c hat eine bemerkenswerte Form: Sie ist ausschließlich aus fundamentalen Naturkonstanten zusammengesetzt, die unabhängig vom Bezugssystem des Betrachters sind, was sich folglich auf die Größe c überträgt.

Grundlage der klassischen Mechanik ist das galileische Relativitätsprinzip, das besagt, dass die Naturgesetze in allen Inertialsystemen – solchen Bezugssystemen, in denen Körper, auf die keine Kraft wirkt, sich geradlinig fortbewegen – dieselbe Form haben (*Galilei-Invarianz*). Ein sich zu einem Inertialsystem mit konstanter Geschwindigkeit fortbewegendes Bezugssystem ist ebenfalls ein Inertialsystem.

Nach diesem Relativitätsprinzip wäre nun zu erwarten, dass ein Beobachter, der sich mit einer konstanten Geschwindigkeit relativ zur elektromagnetischen Welle bewegt, eine unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit misst, wie etwa auch ein mit konstanter Geschwindigkeit fortbewegender Spaziergänger am Rande eines Teiches eine andere Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Wasserwelle auf dem Teich feststellen würde als ein ruhender Beobachter. Die Maxwellgleichungen sagen aber für beide Beobachter die gleiche Ausbreitungsgeschwindigkeit voraus – sie sind nicht Galilei-invariant.



Dieser Widerspruch zur klassischen Mechanik löst sich allerdings nicht zu Ungunsten der Maxwellgleichungen auf: Die Tatsache, dass sich elektromagnetische Wellen (also Licht in einem weiter gefassten Sinne) in allen Inertialsystemen mit der gleichen Geschwindigkeit ausbreiten – die vielzitierte *Konstanz der Lichtgeschwindigkeit* – bildet ein Postulat Einsteins 1905 veröffentlichter spezieller Relativitätstheorie, die experimentell sehr gut bestätigt ist. An Stelle der Galilei-Invarianz tritt die sogenannte *Lorentz-Invarianz*.

Mathematische Beschreibung

Herleitung der elektromagnetischen Wellengleichung

Die zur Wellenausbreitung gehörigen mathematischen Beziehungen lassen sich auf Basis der maxwellschen Gleichungen nachvollziehen. Insbesondere lässt sich dieselbe Wellengleichung herleiten, mit der sich auch Schallwellen ausbreiten, obwohl dort völlig andere, rein mechanische Grundlagen maßgebend sind.

Eine elektromagnetische Welle breitet sich im Vakuum aus, und zwar im ladungsfreien Raum unter Ausschluss von dielektrischen, dia- und paramagnetischen Effekten ($\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}$ und $\vec{B} = \mu_0 \vec{H}$, siehe Materialgleichungen der Elektrodynamik). Die Stromdichte \vec{j} und Ladungsdichte ϱ betragen null.

Ausgehend von der dritten maxwellschen Gleichung

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

wendet man auf beide Seiten den Rotationsoperator an. Dadurch erhält man:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\nabla \times \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H}).$$

Setzt man darin die vierte maxwellsche Gleichung (mit $\vec{j} = 0$) ein,

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t},$$

ergibt sich

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = -\mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (2)$$

Dazu gilt ganz allgemein die vektoranalytische Beziehung

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{A}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \Delta \vec{A}$$

mit dem Laplace-Operator

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}.$$

Wendet man diese Beziehung auf \vec{E} an und berücksichtigt, dass der ladungsfreie Raum betrachtet wird, in dem nach der ersten Maxwellschen Gleichung die Divergenz von \vec{D} null beträgt, so folgt:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \Delta \vec{E} = -\Delta \vec{E}. \quad (3)$$

Setzt man nun (2) und (3) zusammen, ergibt sich folgende Wellengleichung:

$$\Delta \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (4)$$

Fast alle Wellen lassen sich durch Gleichungen der Form

$$\frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = v^2 \Delta f$$

beschreiben, wobei v die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle ist. Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen, die Lichtgeschwindigkeit c , gilt daher:

$$c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}.$$

Damit erhält man aus (4) die Gleichung

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = c^2 \Delta \vec{E}.$$

Analog kann man für die magnetische Flussdichte \vec{B} die Beziehung

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = c^2 \Delta \vec{B}$$

herleiten. Die Lösungen dieser Gleichungen beschreiben Wellen, die sich im Vakuum mit Lichtgeschwindigkeit c ausbreiten. Breitet sich die elektromagnetische Welle in isotropem Material mit der Dielektrizitätskonstante ϵ und der Permeabilität μ aus, beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit

$$c_{med} = \frac{1}{\sqrt{\mu \epsilon}}.$$

Darin sind aber im Allgemeinen die Materialkonstanten nicht linear, sondern können selbst beispielsweise von der Feldstärke oder der Frequenz abhängen. Während Licht sich in der Luft immer noch fast mit Vakuumlichtgeschwindigkeit c ausbreitet (die Materialkonstanten sind in guter Näherung 1), gilt das für die Ausbreitung in Wasser nicht, was unter anderem den Tscherenkow-Effekt ermöglicht.

Das Verhältnis der Vakuumlichtgeschwindigkeit zur Geschwindigkeit im Medium wird als Brechzahl n bezeichnet.

$$n = \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{\mu_0 \epsilon_0}} = \sqrt{\mu_r \epsilon_r},$$

wo μ_r und ϵ_r die relative Permeabilität und die relative Permittivität des Mediums bezeichnen.

Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Mit Hilfe der Maxwellgleichungen lassen sich aus der Wellengleichung noch weitere Schlüsse ziehen. Betrachten wir eine allgemeine Welle für das elektrische Feld

$$\vec{E} = \vec{E}_0 f(\hat{k} \cdot \vec{x} - ct),$$

wo \vec{E}_0 die (konstante) Amplitude ist, f eine beliebige C^2 -Funktion, \hat{k} ein Einheitsvektor, der in Propagationsrichtung zeigt, und \vec{x} ein Ortsvektor. Zunächst sieht man durch Einsetzen in die Wellengleichung, dass $f(\hat{k} \cdot \vec{x} - ct)$ die Wellengleichung erfüllt, dass also

$$\Delta f(\hat{k} \cdot \vec{x} - ct) = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} f(\hat{k} \cdot \vec{x} - ct).$$

Damit \vec{E} nun eine elektromagnetische Welle beschreibt, muss es aber nicht nur die Wellengleichung erfüllen, sondern auch die Maxwellgleichungen. Das bedeutet zunächst

$$\nabla \cdot \vec{E} = \hat{k} \cdot \vec{E}_0 f'(\hat{k} \cdot \vec{x} - ct) = 0,$$

$$\vec{E} \cdot \hat{k} = 0.$$

Das elektrische Feld steht also stets senkrecht zur Propagationsrichtung, es handelt sich also um eine Transversalwelle.

Einsetzen von \vec{E} in eine weitere Maxwellgleichung ergibt

$$\nabla \times \vec{E} = \hat{k} \times \vec{E}_0 f'(\hat{k} \cdot \vec{x} - ct) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t},$$

$$\vec{B} = \frac{1}{c} \hat{k} \times \vec{E}.$$

Die magnetische Flussdichte in der elektromagnetischen Welle steht also ebenfalls senkrecht zur Propagationsrichtung und auch senkrecht zum elektrischen Feld. Außerdem sind ihre Amplituden proportional zueinander:

$$E_0 = c \cdot B_0.$$

In natürlichen Einheiten ($c = 1$) sind die Amplituden sogar gleich.

Mit dieser Beziehung lässt sich auch eine Aussage über die Energiedichte des elektromagnetischen Felds

$$w_{em} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 (E^2 + c^2 B^2)$$

für den Fall der elektromagnetischen Welle herleiten:

$$w_{em} = \varepsilon_0 E^2 = \frac{1}{\mu_0} B^2.$$

Siehe auch

- Radar
- Funktechnik

Literatur

- John David Jackson: *Klassische Elektrodynamik*. 4 Auflage. De Gruyter, 2006, ISBN 978-3110189704.
- Claus Müller: *Grundprobleme der mathematischen Theorie elektromagnetischer Schwingungen*. Springer, 1957.
- K. Küpfmüller und G. Kohn: *Theoretische Elektrotechnik und Elektronik, Eine Einführung*. 16. Auflage. Springer, 2005, ISBN 3-540-20792-9.
- Károly Simonyi: *Theoretische Elektrotechnik*. 10. Auflage. Barth Verlagsgesellschaft, 1993, ISBN 3-335-00375-6.

- Karl Rower: *Wave Propagation in the Ionosphere*. Kluwer Acad.Publ., 1993, ISBN 0-7923-0775-5.

Weblinks

- Versuche und Aufgaben ^[3]
- Umrechnung: Frequenz in Wellenlänge und zurück – Elektromagnetische Wellen und Schallwellen ^[4]
- Forscher machen erstmals Lichtwellen sichtbar ^[5]
- Elektromagnetische Strahlung ^[6]
- Einfache Simulation zur Ausbreitung von elektromagnetischer Strahlung ^[7]
- Anschauliche Herleitung von elektromagnetischen Wellen aus den Maxwell-Gleichungen, nahezu formelfrei ^[8]

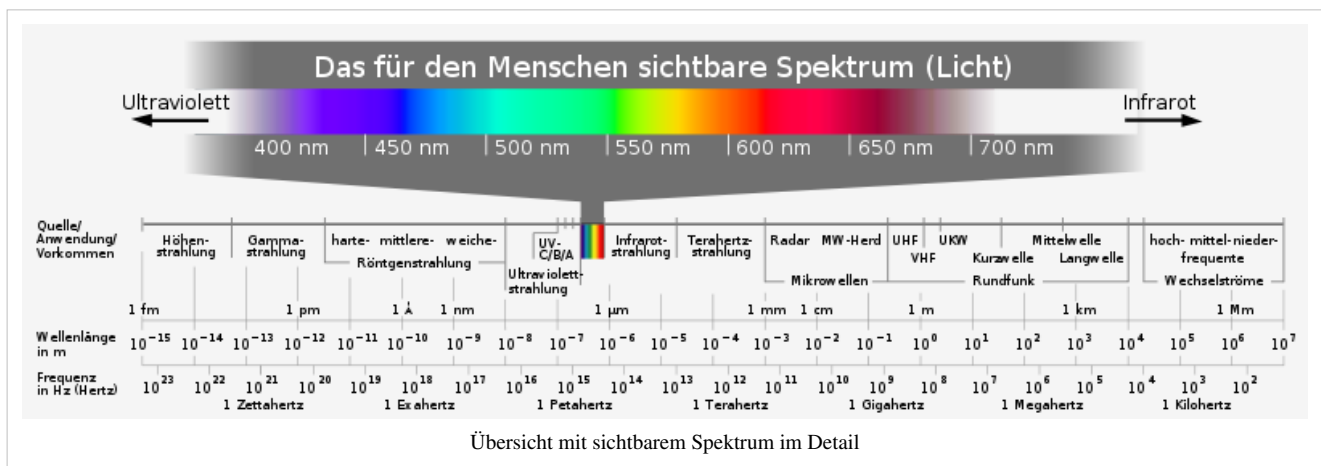
Einzelnachweise

- [1] Gerthsen Physik. 22. Auflage, S. 177.
 [2] siehe: Literatur /K.Rower
 [3] http://www.physik.uni-muenchen.de/leifiphysik/web_ph12/materialseiten/m05_elma_wellen.htm
 [4] <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-wellenlaenge.htm>
 [5] <http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/dokumentation/pressemitteilungen/2004/pressemitteilung20040827/>
 [6] http://www.drfreund.net/astronomy_spektrum.htm
 [7] <http://www.phys.hawaii.edu/~teb/java/ntnujava/emWave/emWave.html>
 [8] <http://www.scienceblogs.de/hier-wohnen-drachen/2010/08/die-maxwellgleichungen-fast-ohne-formeln-3-wir-bauen-eine-welle.php>

Elektromagnetisches Spektrum

Als **Elektromagnetisches Spektrum** oder **elektromagnetisches Wellenspektrum** bezeichnet man die Gesamtheit aller elektromagnetischen Wellen, wenn an ihre Unterteilung in Bereiche wie etwa Licht, Radiowellen usw. gedacht ist. Die Frequenzen liegen dabei meist um Größenordnungen auseinander.

Geordnet nach abnehmender Wellenlänge (gleichbedeutend mit zunehmender Frequenz) befinden sich am Anfang des Spektrums die Längstwellen, deren Wellenlängen viele Kilometer betragen. Am Ende stehen die sehr kurzwellig und damit energiereichen Gammastrahlen, deren Wellenlänge bis in atomare Größenordnungen reicht.



Die Umrechnung von der Wellenlänge in eine Frequenz f erfolgt mit der einfachen Formel $f = c/\lambda$, also Lichtgeschwindigkeit (im jeweiligen Medium) geteilt durch die Wellenlänge.

Den Erkenntnissen der Quantenmechanik folgend, bestehen elektromagnetische Wellen aus einem Strom von Teilchen, den Photonen. Diese Betrachtung dient zur Erklärung verschiedener physikalischer Phänomene wie dem photoelektrischen Effekt. Photonen besitzen eine zur Frequenz proportionale Energie $E = h \cdot f$. Die Konstante h ist dabei das plancksche Wirkungsquantum. Die Energie ist in der folgenden Tabelle in Joule (J) und in

Elektronenvolt (eV) angegeben.

In welchen Fällen welches Modell geeigneter ist, wird im Artikel Elektromagnetische Welle anhand von Beispielen erläutert.

Übersicht elektromagnetisches Spektrum

Bezeichnung des Frequenzbereichs	Unter-Bezeichnung	Wellenlänge		Frequenz		Photonen- Energie	Erzeugung / Anregung	Technischer Einsatz	
		von	bis	von	bis				
Niederfrequenz	Extremely Low Frequency (ELF)	10 Mm	100 Mm	3 Hz	30 Hz	$> 2,0 \times 10^{-33} \text{ J}$ $> 1,2 \text{ aeV}$	Bodendipol, Antennenanlagen	Bahnstrom	
	Super Low Frequency (SLF)	1 Mm	10 Mm	30 Hz	300 Hz	$> 2,0 \times 10^{-32} \text{ J}$ $> 120 \text{ feV}$		Netzfrequenz, (ehemals) U-Boot-Kommunikation	
	Ultra Low Frequency (ULF)	100 km	1000 km	300 Hz 0,3 kHz	3000 Hz 3 kHz	$> 2,0 \times 10^{-31} \text{ J}$ $> 12 \text{ feV}$			
	Very Low Frequency (VLF) Myriameterwellen Längstwellen (SLW)	10 km	100 km	3 kHz	30 kHz	$> 2,0 \times 10^{-30} \text{ J}$ $> 1,2 \text{ feV}$		U-Boot-Kommunikation (DHO38, ZEVS, Sanguine, SAQ), Funknavigation, Pulsuhren	
Radiowellen	Langwelle (LW)		10 km	30 kHz	300 kHz	$> 2,0 \times 10^{-29} \text{ J}$ $> 120 \text{ peV}$	Oszillatorschaltung + Antenne	Langwellenrundfunk, DCF77	
	Mittelwelle (MW)		650 m	300 kHz	1,5 MHz	$> 2 \cdot 10^{-28} \text{ J}$ $> 1,2 \text{ neV}$		Mittelwellenrundfunk, HF-Chirurgie	
	Kurzwelle (KW)		180 m	1,7 MHz		$> 1,1 \times 10^{-27} \text{ J}$ $> 6,9 \text{ neV}$		Kurzwellenrundfunk, HAARP, Diathermie, RC-Modellbau	
	Ultrakurzwelle (UKW)		10 m	30 MHz	300 MHz	$> 2,0 \times 10^{-26} \text{ J}$ $> 120 \text{ neV}$	Anregung von Kernspinresonanz	Hörfunk, Fernsehen, Radar, Magnetresonanztomografie	
Mikrowellen	Dezimeterwellen	10 cm	1 m	300 MHz	3 GHz	$> 2,0 \times 10^{-25} \text{ J}$ $> 1,2 \text{ }\mu\text{eV}$	Magnetron, Klystron, Maser, kosmische Hintergrundstrahlung	Radar, Magnetresonanztomografie, Mobilfunk, Fernsehen, Mikrowellenherd, WLAN, Bluetooth, GPS	
	Zentimeterwellen	1 cm	10 cm	3 GHz	30 GHz	$> 2,0 \times 10^{-24} \text{ J}$ $> 12 \text{ }\mu\text{eV}$	Anregung von Kernspinresonanz und Elektronenspinresonanz, Molekülrotationen		Radar, Radioastronomie, Richtfunk, Satellitenfernsehen, WLAN
	Millimeterwellen	1 mm	1 cm	30 GHz	300 GHz 0,3 THz	$> 2,0 \times 10^{-23} \text{ J}$ $> 120 \text{ }\mu\text{eV}$			Radar, Radioastronomie, Richtfunk
Terahertzstrahlung		30 μm	3 mm	0,1 THz	10 THz	$> 6,6 \times 10^{-23} \text{ J}$ $> 0,4 \text{ meV}$	Synchrotron, Freie-Elektronen-Laser	Radioastronomie, Spektroskopie, Abbildungsverfahren, Sicherheitstechnik	

Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung)	<i>Fernes Infrarot</i>	50 μm	1 mm	300 GHz		$> 2,0 \times 10^{-22} \text{ J}$ $> 1,2 \text{ meV}$	Wärmestrahler, Synchrotron Molekülschwingungen	Infrarotspektroskopie, Raman-Spektroskopie, Infrarotastronomie
	<i>Mittleres Infrarot</i>	2,5 μm	50 μm	6 THz		$> 4,0 \times 10^{-21} \text{ J}$ $> 25 \text{ meV}$	Kohlendioxidlaser	Thermografie
	<i>Nahes Infrarot</i>	780 nm	2,5 μm	120 THz		$> 8,0 \times 10^{-20} \text{ J}$ $> 500 \text{ meV}$	Nd:YAG-Laser, Laserdiode	Fernbedienung, Datenkommunikation (IRDA), CD
Licht	<i>Rot</i>	640 nm	780 nm	384 THz	468 THz	1,6 – 1,95 eV	Wärmestrahler (Glühlampe), Gasentladung (Neonröhre), Farbstoff- und andere Laser, Synchrotron Anregung von Valenzelektronen	DVD, Laserpointer, Rot, Grün: Lasernivellier, Beleuchtung, Colorimetrie, Fotometrie, Rot, Gelb, Grün: Lichtzeichenanlage, Violett: Blu-ray Disc
	<i>Orange</i>	600 nm	640 nm	468 THz	500 THz	1,95 – 2,06 eV		
	<i>Gelb</i>	570 nm	600 nm	500 THz	526 THz	2,06 – 2,17 eV		
	<i>Grün</i>	490 nm	570 nm	526 THz	612 THz	2,17 – 2,53 eV		
	<i>Blau</i>	430 nm	490 nm	612 THz	697 THz	2,53 – 2,88 eV		
	<i>Violett</i>	380 nm	430 nm	697 THz	789 THz	$> 4,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ $> 2,9 \text{ eV}$		
UV-Strahlen	<i>schwache UV-Strahlen</i>	200 nm	380 nm	789 THz	1500 THz 1,5 PHz	$> 5,2 \times 10^{-19} \text{ J}$ $> 3,3 \text{ eV}$	Gasentladung, Synchrotron, Excimerlaser	Schwarzlicht Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Banknotenprüfung, Fotolithografie, Desinfektion, UV-Licht, Spektroskopie
	<i>Starke UV-Strahlen</i>	50 nm	200 nm	1,5 PHz	6 PHz	$> 9,9 \times 10^{-19} \text{ J}$ $> 6,2 \text{ eV}$	Gasentladung, Synchrotron, Excimerlaser	
	<i>XUV</i>	1 nm	50 nm	6 PHz	300 PHz	$> 5,0 \times 10^{-18} \text{ J}$ 20 – 1000 eV	XUV-Röhre, Synchrotron	EUV-Lithografie, Röntgenmikroskopie, Nanoskopie
Röntgenstrahlen		10 pm	1 nm	300 PHz	30000 PHz 30 EHz	$> 2,0 \times 10^{-16} \text{ J}$ $> 1 \text{ keV}$	Röntgenröhre Anregung von inneren Elektronen, Auger-Elektronen	medizinische Diagnostik, Sicherheitstechnik, Röntgen-Strukturanalyse, Röntgenbeugung, Spektroskopie
Gammastrahlen			10 pm	30 EHz		$> 2,0 \times 10^{-14} \text{ J}$ $> 120 \text{ keV}$	Radioaktivität, Annihilation Anregung von Kernzuständen	medizinische Strahlentherapie

Siehe auch

- Vorsätze für Maßeinheiten
- Frequenzband

Literatur

- *DIN 5031: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Benennung der Wellenlängenbereiche.* Januar 1984 (IR, VIS und UV).

Weblinks

- Poster "Electromagnetic Radiation Spectrum" ^[1] (PDF, englisch; 992 kB)
- Das Elektromagnetische Spektrum ^[2] auf Welt der Physik
- Elektromagnetische Spektrum ^[3] Grundlagen der Teilchenphysik

Referenzen

[1] http://unihedron.com/projects/spectrum/downloads/spectrum_20090210.pdf

[2] <http://www.weltderphysik.de/de/3790.php>

[3] http://www.solstice.de/grundl_d_tph/exp_welle/exp_welle_03.html

Entstehung von Farben

Farbe entsteht im menschlichen und tierischen Sehorgan als Farbvalenz, wenn ein Farbreiz, das ist Licht mit Wellenlängen zwischen 380 nm und 780 nm und mit spektraler Intensitätsverteilung die Zapfen entsprechend deren Wahrnehmungsspektrum erregt. Hier wird erklärt wie diese spektrale Verteilung entstehen kann. Sinngemäß trifft dies für alle elektromagnetischen Wellen zu.

Farben selbst leuchtender Objekte

Das für das Erkennen von Farbe nötige Licht kann direkt von „Strahlern“ verschiedener Art ausgehen.

Emission

Es werden in Atomen die Elektronen durch Zufuhr von Energie *angeregt*, und so in einen Zustand höherer Energie versetzt. Nach kurzer Zeit fällt das angeregte Elektron wieder in einen Zustand niedrigerer Energie zurück und gibt die zuvor erhaltene Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung ab.

Je höher die Energie des Elektronensprungs ist, desto kurzwelliger ist die Strahlung. Liegt die Strahlung im Bereich des sichtbaren Lichts, sieht man den Körper leuchten.

Da die Elektronen eines Atoms nicht beliebige, sondern nur ganz bestimmte Energiezustände einnehmen können, werden immer nur ganz bestimmte Mengen an Energie (Quanten) und damit ganz bestimmte Wellenlängen abgestrahlt. Das Ergebnis sind sogenannte Spektrallinien, deren monochromatisches Licht vom Menschen als je eine Spektralfarbe wahrgenommen wird.



Straßenbeleuchtung mit Natriumdampf Lampe, die engbandiges Licht abstrahlt (mit innerer Reflexion im Kamerasystem)

Beispielhaft kann man diese Wirkung bei der Spektralanalyse oder durch einen Demonstrationsversuch am Gasherd verfolgen. Hierbei wird Natriumchlorid in die Flamme gebracht. Durch deren Hitze werden Elektronen der äußeren Schale der Natriumatome angeregt. Fallen diese Elektronen wieder in den Grundzustand, senden sie ein Photon im Bereich des orangen Lichtes aus. Auch an Straßenlaternen mit Natriumdampflampen sieht man diesen Farbeffekt.

Kontinuierliches Spektrum

Es gibt nicht nur die Emission monochromatischer Linien. Alle Körper senden durch ihren Wärmeinhalt ein kontinuierliches Spektrum aus, dessen spektrale Verteilung von der Temperatur abhängt. Die Ursache ist hier letztlich der Bewegungszustand der Moleküle. Wird bei Zimmertemperatur eine Wärmestrahlung im Infrarot gesendet, verschiebt sich das Strahlungsmaximum mit zunehmender Temperatur nach Rot (sichtbares Rotglühen) über Gelb und Weiß und schließlich nach Blau. Davon kommt der Eindruck des „gelben“ Kerzenlichts über das Weiß des Sonnenlichts bis hin zum „grellen Weiß“ eines Lichtbogens und dem blauweißen Eindruck der Plasmalampen.



Spektrum des Sonnenlichtes, wie es durch das Prismensystem der Kamera zerlegt wird.

Zerlegt man das Licht solcher heißer Lichtquellen durch ein Prisma oder ein Beugungsgitter, so sieht man ein kontinuierliches Spektrum mit allen Farben.

Farben nicht selbst leuchtender Objekte

Das für die Erkennung von Farbe notwendige Licht kann auch indirekt nach Änderungen der spektralen Zusammensetzung von Körpern reflektiert oder durchgelassen werden.

Remission

Viele Körper „haben“ von Natur aus eine Eigenfärbung (grüne Pflanzen, rotes Blut, verschiedene farbige Blüten, rote oder braune Erde). Andere Körper wurden absichtlich mit einer gewünschten Farbe versehen. Beispielhaft hierfür ist jede mit einem Färbemittel gefärbte Textilie, ein lackiertes Auto oder ein angestrichenes Haus.

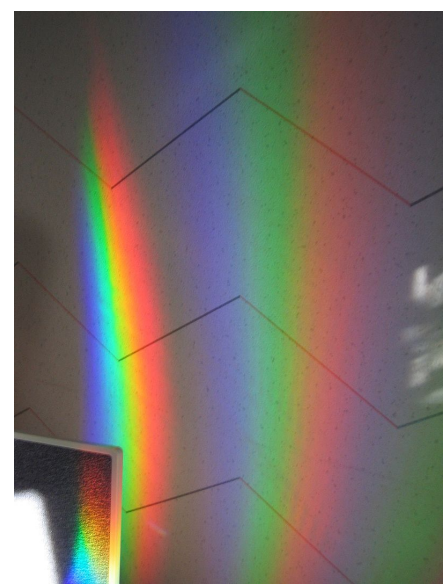
In diesen Fällen wird nur ein Teil des Lichtes, das auf die farbigen Körper fällt, wieder reflektiert. Die spektrale Zusammensetzung des reflektierten Lichts ist verändert gegenüber der Beleuchtung, und erweckt damit einen Farbeindruck beim Betrachten des Körpers.

Streuung

Die spektrale Zusammensetzung des gestreuten Lichtes ist nicht in allen Streurichtungen die gleiche. Die Streuung hängt stark vom Verhältnis der Teilchengröße zur Wellenlänge ab. In milchigen Medien (wie Milchglas, Opal, staubige Luft) werden die längeren Wellen weniger gestreut als die kürzeren. Deshalb erscheinen solche Medien im Durchlicht gelb bis rot, im Streulicht eher blau. Ein Beispiel hierfür ist das Blau des Himmels und das Rot des Sonnenauf- oder Untergangs.

Brechung

Beim Durchgang des Lichtstrahls durch eine Grenzfläche zwischen zwei optisch durchsichtigen Medien mit unterschiedlicher Brechzahl, wird er durch den Unterschied in den Lichtgeschwindigkeiten abgelenkt. Licht unterschiedlicher Wellenlänge wird verschieden stark gebrochen, da die Lichtgeschwindigkeiten in dichten Medien von der Wellenlänge abhängen. Polychromatisches (= mehrfarbiges) Licht verschiedener Wellenlängen (entsprechend unterschiedlicher (wahrgenommener) Farben) werden unterschiedlich abgelenkt. So kommt es zu einer spektralen Aufspaltung, zur sogenannten *Dispersion*. Das bekannteste Beispiel ist der Regenbogen.



Dispersion: Farben durch unterschiedlich starke Brechung

Interferenz

Bei der Interferenz werden Lichtwellen an dünnen Schichten in zwei Anteile gespalten, die mit einander in eine Wechselwirkung von Verstärkung oder Auslöschung treten. Je nach der Schichtdicke findet die Auslöschung bei unterschiedlichen Wellenlängen statt. Dadurch verändert sich die spektrale Zusammensetzung des auftreffenden Lichtes, das reflektierte oder durchgelassene Licht erweckt deshalb einen Farbeindruck. Typisch sind die Farbringe von auf Wasser ausgebreiteten Öltropfen oder sich bewegenden Schlieren auf Seifenblasen. Sehr schöne Beispiele dafür sind auch die Interferenzfarben der Flügel Federn von Kolibris und Pfauen oder der Flügelschuppen von Schmetterlingen.



Öltropfen auf einer feuchten Straße durch Newtonsche Interferenz

Strukturfarben

Strukturfarben sind besondere Interferenzfarben. Sie entstehen, wenn regelmäßige Feinstrukturen zu einer Beugungsinterferenz zwischen den reflektierten oder durchtretenden Lichtwellen führt. Die dabei sichtbaren Farben hängen vom Einfallswinkel des Lichtes und von der Betrachtungsrichtung ab. Leicht zu beobachtendes Beispiel sind die „schillernden“ CDs oder Oberflächenhologramme (Heliogramme). Auch die schillernden Oberflächen einiger Insekten wie Käfer und Schmetterlinge werden auf diese Art farbig.

Siehe auch

- Chemisch-physikalische Grundlagen für die Farbigkeit eines Stoffes
- Körperfarbe
- Lichtfarbe
- Grundfarbe

Literatur

- Hannelore Dittmar-Ilgen: *Wie das Salz ins Meerwasser kommt*. Hirzel Verlag., Stuttgart 2005, ISBN 3-7776-1315-0.

Weblink

- Artikel über Strukturfarben auf naklar.at ^[1]

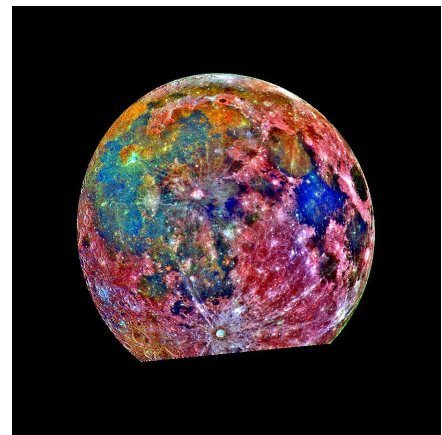
Referenzen

[1] <http://www.naklar.at/content/features/strukturfarben/>

Falschfarben

In einer **Falschfarbendarstellung** werden gezielt Farben, die vom natürlichen Farbeindruck abweichen, verwendet. Daher rührt auch die Bezeichnung **Falschfarben**.

Wissenschaftler verwenden diese, um feine Nuancen eines Farbtons oder einer Graustufe in einem Bild deutlich unterscheidbar zu machen. Bei der Falschfarbendarstellung im wörtlichen Sinne werden die Farbkanäle des Originalbildes anderen Farben zugeordnet – beispielsweise Rot zu Blau und Blau zu Grün. Bei der **Farbkodierung** werden einzelnen Helligkeitsstufen eines Farbtons verschiedene Farbwerte zugeordnet.



Ein Falschfarbenbild des Mondes, aufgenommen mit drei Farbfiltern



Farbkodierte Darstellung (oben) eines Graustufenbildes (unten). Rechts die verwendete Farbskala.

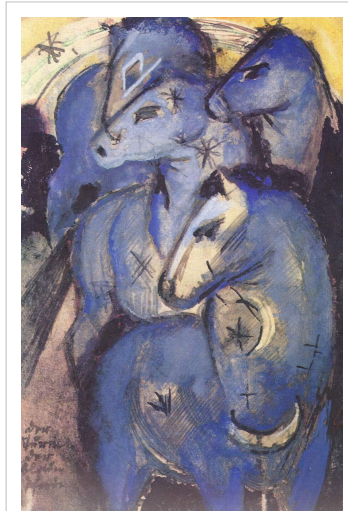
Wahrnehmung

Der Mensch kann natürliche Farbreize als Farbvalenz wahrnehmen. Diese Transformation des physikalischen Signals in eine psychologische Wahrnehmung erfolgt in dem natürlichen (angeborenen) und „erfahrungsgemäß beeinflussten“ LMS-Farbraum. So wird ein Farbreiz bestimmter spektraler Zusammensetzung von allen normalsichtigen Menschen aus unterschiedlichen Kulturkreisen nahezu gleich „gesehen“. Üblicherweise ist es das Ziel die Naturfarbe empfindungsgemäß korrekt darzustellen indem die Transformation dem Sehsinn gerecht erfolgt.

Kunstmaler mit der ältesten „bildgebenden Methode“ haben ihre künstlerische Freiheit genutzt. Dem Maler gelingt es, die am Modell wahrgenommene Farbvalenz *willentlich* durch Auswahl der Farbmittel seiner individuellen Palette als anderen Farbreiz auf der Leinwand darzustellen.

Durch bildgebende Verfahren ist es möglich, die spektrale Zusammensetzung der Bildelemente auf der „Eingangsseite“ in einen anderen Farbraum umzuwandeln und so als Falschfarbe auszugeben. Unbeabsichtigt passiert es beim Versagen des automatischen Weißabgleichs als Farbstich. Bei den gewollten Anwendungen können geringe Unterschiede im Farbton in deutlicher sichtbare umgesetzt werden.

Der Falschfarbendarstellung liegt das Prinzip zugrunde, dass die Farbwahrnehmung des menschlichen Auges zwar auf einige hundert Helligkeitsstufen eines Farbtons begrenzt ist, aber etwa eine Million Farbschattierungen unterscheiden kann^[1]. Statt einer Grauskala, die von weiß bis schwarz reicht, wird eine Farbskala verwendet, die von gelb über rot bis blau reichen kann. Dadurch entstehen Bilder, die Details wesentlich deutlicher erkennen lassen.

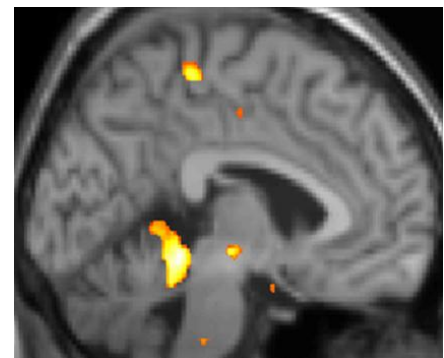


Pferde haben viele Fellfarben, aber Franz Marc gibt sie in seinem Bild als blau wieder

Anwendungen

Falschfarbendarstellung

Luftbildaufnahmen und Satellitenbilder sind klassische Anwendungsgebiete der Falschfarbendarstellung. Bei diesen Bildern wird häufig nicht mit Farbfilmen gearbeitet, die auf eine möglichst natürliche Farbwiedergabe für das menschliche Auge optimiert sind, sondern es werden einzelne Spektralbereiche mit Farbfiltern auf Schwarzweißfilme oder farbumpfindliche elektronische Sensoren abgebildet. Auch unsichtbare Strahlung wie ultraviolettes oder infrarotes Licht kann so aufgenommen werden. Solche multispektralen Aufnahmen sind beispielsweise geeignet, Vegetationsflächen von Ödland oder bebautem Gebiet zu unterscheiden, selbst wenn diese für den Menschen eine ähnliche Farbe haben. In einer Falschfarbendarstellung kann dann beispielsweise der Vegetation ein Rotton zugeordnet werden und dem Ödland ein Blauton. So entsteht eine *Falschfarbendarstellung*, die die gewünschte Information prägnant und leicht erkennbar darstellt.

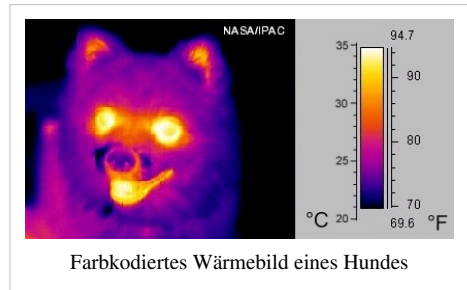


Farbkodierte Darstellung eines PET-Bildes der Gehirnaktivität

Farbkodierung

Viele bildgebende Verfahren der Medizin, wie die Magnetresonanztomografie, Ultraschall oder Röntgentomographie, oder der Physik, wie die Thermographie, erzeugen Bilder, die keine Farbinformation enthalten. Für solche Bilder verwendet man eine *farbkodierte* Darstellung. Dabei werden die einzelnen Graustufen durch unterschiedliche Farben in der Darstellung repräsentiert. So ergibt sich eine deutlichere Erkennung kleiner Nuancen im Bild.

Beispielsweise können in einer Röntgentomographie verschiedene Gewebetypen in verschiedenen Farben dargestellt werden. Grundlage dafür ist die größere Tiefe in der Bit-Darstellung.



Einzelnachweise

[1] E. Br. Goldstein: *Sensation and Perception*. Itps Thomson Learning, 2003, ISBN 978-0-534-63991-4

Farbart

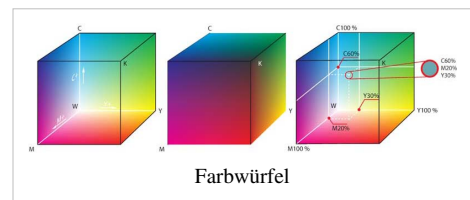
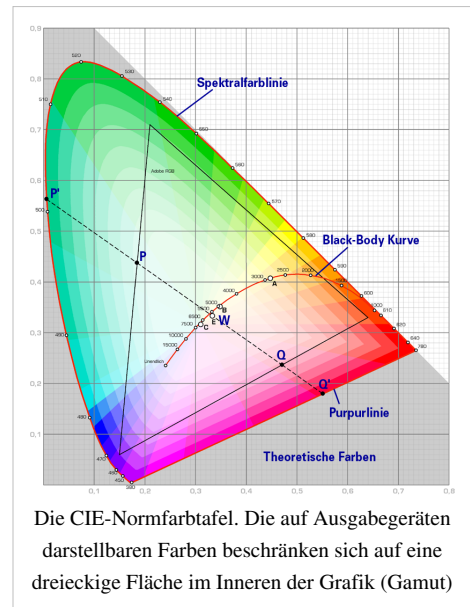
Farbart (artgleiche Farben) bezeichnet in der Farbmeterik die Zusammenfassung von Farben nach Buntton und Farbsättigung, aber bei verschiedener Helligkeit. Je nach Anwendungsebene beruht die Farbart auf unterschiedlichen Grundfarben oder Urfarben.

Grundlegendes

Dieser Begriff ist in CIE 845-03-34 und darauf fußend auch in DIN 5033 definiert.

Eine Farbe ist nach den Graßmannschen Gesetzen eindeutig durch drei Parameter identifizierbar. Ein Farbreiz wird durch die drei Zapfen im Auge analysiert. Dadurch werden aus dem kontinuierlichen Spektrum drei Farbvalenzen „herausgefiltert“. Die physikalische Ursache der Farbwahrnehmung ist die Vielzahl von Werten, Intensitäten über den Wellenlängen. Allgemein mit den folgenden Formelzeichen benannt: $\beta(\lambda)$ für Remission an Körperfarben, $\tau(\lambda)$ für Transmission an Filtern, $\sigma(\lambda)$ bei Lichtfarben. Durch den Sehsinn wird daraus eine Dreizahl an Empfindungen, die im Nervensystem aufbereitet den Farbeindruck ergeben. Diese drei Parameter lassen sich auf unterschiedliche Weise in einem dreidimensionalen Farbraum darstellen.

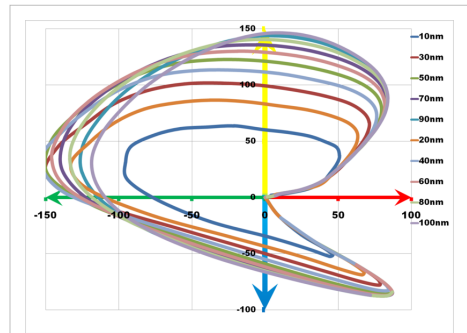
Je nach der Anwendungsebene oder der Wahrnehmungskategorie beruht die Farbart auf drei Grundfarben, den Farbreizen der Drei-Farben-Theorie (Rot, Grün, Blau) oder in vier gegensätzlichen Grundfarben der Gegenfarbtheorie (Rot-Grün und Gelb-Blau). Die Unbuntfarben bleiben dabei nur mittelbar bewertet.



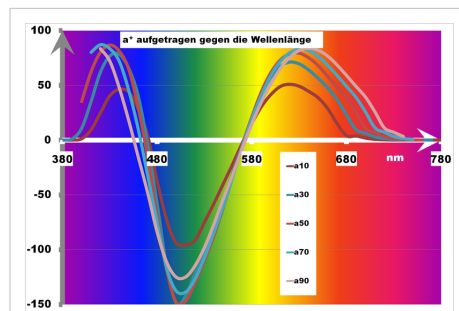
Der Farbraum kann so gewählt werden, dass die Helligkeit einer eigenen Achse zugeordnet ist. Die verbleibenden Koordinaten geben sodann die Farbart an. Die Helligkeit kann auch als Hellbezugswert A oder Neutralgrauwert angesehen werden.

Im CIEXYZ-Farbsystem ergibt sich so die xy-Farbfläche (Chromatizitäts-Diagramm). Im $L^*a^*b^*$ -Farbraum des CIE-Systems von 1976 wird die Farbart in der a^*-b^* -Ebene angegeben. Wobei a^* für eine Grün-Rot und die b^* -Achse für die Blau-Gelb-Werte steht. Diese Form der Farbdarstellung bietet den Vorteil, dass dadurch eine dem *gewohnten* Farbkreis entsprechende Angabe möglich ist. Diese Farbartkoordinaten im kartesischen System lassen sich in Polarkoordinaten $C-h^\circ$ (Chroma, Hue) umformen, die dem ungeübten und damit praktikableren Farbverständnis entgegenkommen und dem Farbkreis entsprechen.

Im RGB-Farbraum und im CMYK-Farbraum ist die Darstellung der Farbart nicht sinnvoll, da hier die Emissionsfarben der drei Leuchtstoffe, der drei Farbfilter oder im CMYK-Raum die drei Farbpigmente zugrundegelegt wurde. Das vierte Farbpigment K (Schwarz) ist nach Definition hierbei lediglich eine Ergänzung, um „Tiefe“ zu erreichen. In beiden Farbräumen ist Helligkeit nicht unmittelbarer Parameter und die Farbart ist somit über den gesamten Raum gelegt.



Plot der Änderung von a^* gegen b^* ($L^*a^*b^*$ -Farbraum) bei Wellenlängen λ von 380 nm bis 780 nm (errechnet aus Rechteckspektren der angegebenen Breite mit Intensität = 100%)



Plot von a^* gegen b^* ($L^*a^*b^*$) bei wachsender Wellenlänge zwischen 380 nm und 780 nm (berechnet aus Rechteckspektren mit Breiten von 10 nm bis 100 nm, aufgetragen über $\lambda = 380 \dots 780$ nm)

Farbtrio

Seit dem späten Mittelalter ist unter Kunstmalern eine Mischregel aus drei Grundfarben geläufig. Auch für technische Geräte und Verfahren wird die Nutzung von drei *Farbquellen* genutzt. Bei der Farbbildröhre sind dies die drei (RGB-Farben) rot, grün und blau. Sie bilden ein Farb-Trio.

Das **Farbtrio** geht auf Untersuchungen des Engländers James Sowerby zurück, der 1809 sein Isaac Newton gewidmetes Werk *A New Elucidation of Colours* publizierte. Sowerby wollte zum einen die Bedeutung der Helligkeit und Dunkelheit betonen, zum anderen noch einmal darauf hinweisen, dass sich farbiges Licht und farbiges Materie in ihrem Verhalten unterscheiden.

Sowerby ging bei seinen Untersuchungen von den drei Grundfarben Rot, Gelb, Blau aus.

Zu diesen drei kam später noch Grün hinzu, als Hering seine Vierfarbentheorie entwickelte. Im Gegensatz dazu bestimmte der Engländer Thomas Young in seiner Theorie (*Theory of Trichromatic Vision*) wiederum, dass das Auge durch die Wahrnehmung von nur drei Farbtönen alle anderen Farben kombiniert. Young legte aber Rot, Grün, Blau zugrunde und ersetzte Sowerbys gelb durch Grün.

Im 20. Jahrhundert wurde Young experimentell bestätigt. Die Pigmente auf den Zapfen auf der Netzhaut können besonders gut Rotes, Grünes oder Blaues Licht wahrnehmen.

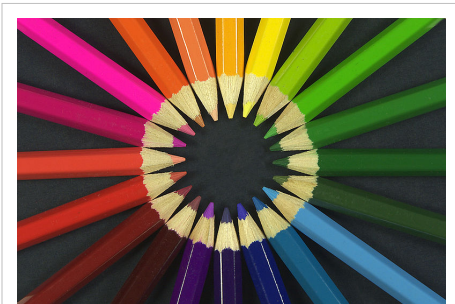
Literatur

- J. Sowerby: *A New Elucidation of Colours, Original, Prismatic, and Material: Showing their Concordance in Three Primitives, Yellow, Red, and Blue: and the Means of Producing, Measuring, and Mixing Them: with Some Observations on the Accuracy of Sir Isaac Newton*. London 1809.
- S. Wurmfield: *Color Documents: A presentational Theory*. Organisiert by Hunter College Art Gallery, New York 1985.
- John Gage: *Kulturgeschichte der Farbe: von der Antike bis zur Gegenwart*. Maier, Ravensburg 1994. Seite 221

Farbe

Farbe ist „diejenige Gesichtsempfindung eines dem Auge des Menschen strukturlos erscheinenden Teiles des Gesichtsfeldes, durch die sich dieser Teil bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge von einem gleichzeitig gesehenen, ebenfalls strukturlosen angrenzenden Bezirk allein unterscheiden kann.“ (Definition nach DIN 5033)

Damit sind sonstige optische Wahrnehmungen wie Struktur (Licht-Schatten-Wirkungen), Glanz, Rauigkeit vom Farbbegriff zu unterscheiden. Die psychischen Effekte und Phänomene des Sehsinns, wie Umstimmung oder Adaption, sind damit ebenfalls ausgeschlossen.



Buntstifte in verschiedenen Farben

Wortsinn Farbe

Die Wortbedeutungen von *Farbe* im übertragenen Sinne sind:

1. Ein *visueller Sinneseindruck*, die Farbigkeit.
2. *Qualitätsunterschiede* dieses Sinneseindrucks
3. *Farbbezeichnung* steht für Qualität und Quantität dieser Wahrnehmung und Klassen von farblichen Eindrücken (*Farbnamen*)
4. *Lichtfarbe*, die Beschreibung der Strahlung von Leuchten, Strahlern
5. *Körperfarbe*, der visuelle (Farb-)Eindruck, der unter dem Einfluss der Lichtfarbe von einem Körper ausgeht
6. *Farbmittel*, im Sinne von „färbendes Mittel“ und bezeichnet vorwiegend Stoffe für farbliche Veränderung, die eine Körperfarbe verursachen (Pigmente, Farbstoffe und Färbelösungen, sowie im weiteren Sinne färbende Anstrichmittel)

In anderen Sprachen wird stärker zwischen dem Effekt Farbe („farbig“) und der Ursache für Farbe („färben“) unterschieden, so im Englischen *colour* und *dye(stuff)*, oder in den romanischen Sprachen (spanisch: *color* und *teñir*).

In diesem Artikel wird mithin nicht über das Entstehen von Farben geschrieben und die erweiterten Begriffe der Farbe werden unter Grundfarbe behandelt.

Wahrnehmung

Farbe ist das Wahrgenommene, sie entsteht durch den visuellen Reiz in Farbrezeptoren als Antwort auf eine Farbvalenz, so wie der mechanische Reiz, durch Druck oder Rauheit hervorgerufen wird. Farbe ist nicht die Eigenschaft des gesehenen Lichtes (Farbreiz), sie ist das subjektive Empfinden der physikalischen Ursache von elektromagnetischen Wellen zwischen 380 nm und 780 nm. Entsprechend der spektralen Farbvalenz (unterschiedliche Intensitäten im Licht) werden unterschiedliche Farbreize hervorgerufen, die unterschiedliche Qualitäten der Farbwahrnehmung bilden, so dass im Ergebnis unterschiedliche Farben wahrgenommen werden.

Das optische Phänomen der Farbwahrnehmung ist ein Forschungsgebiet von umfassender Komplexität. Es sind physikalische (Spektrum), wahrnehmungsphysiologische (Farbreiz) und wahrnehmungspsychologische (Farbvalenz) sowie sprachlich-konventionelle Aspekte verflochten. Die visuelle Wahrnehmung des Menschen erfolgt durch Rezeptoren, die sich auf der Netzhaut befinden: Stäbchen für Hell-/Dunkel-Kontrast, die Zapfen (nicht Zäpfchen!) für die Farbwahrnehmung.

Zapfen sind in drei Ausprägungen vorhanden, die ihr Empfindlichkeitsmaximum in den Spektralbereichen „Rot“, „Grün“ und „Blau“ haben. Farbe lässt sich auf Grund der drei Sorten Farbrezeptoren beim Menschen als dreidimensionale Eigenschaft darstellen. Jede Kombination von Anregungen der drei Zapfenarten durch (Licht-)Strahlung die auf die Netzhaut trifft bewirkt einen spezifischen Farbeindruck. Somit sind auch Schwarz (keinerlei Erregung), Neutralgrau (gleiche Erregung) und Weiß (volle Erregung aller drei Zapfensorten) ebenfalls Farben, die klassifizierend als unbunte Farben benannt werden.

Spektralfarben, wie sie bei der wellenlängenabhängigen Brechung hinter einem Prisma auftreten, dargestellt als Farbkreis der bunten Farben, enthalten nur einige Farbwahrnehmungen. Sichtbare Strahlung ist eine elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm. Werden Farben durch Farbmittel auf Oberflächen ausgelöst, muss zwangsläufig eine Beleuchtungsquelle vorhanden sein. Durch räumliche Nähe bewirkte Kontraste nennt man Simultankontrast, den Nachfolgeeffekt von Gegenfarben Sukzessivkontrast. Mit dem Simultankontrast verwandt sind die farbigen Schatten: Ein mit grünem Licht beleuchteter Gegenstand hat demzufolge einen roten Schatten.

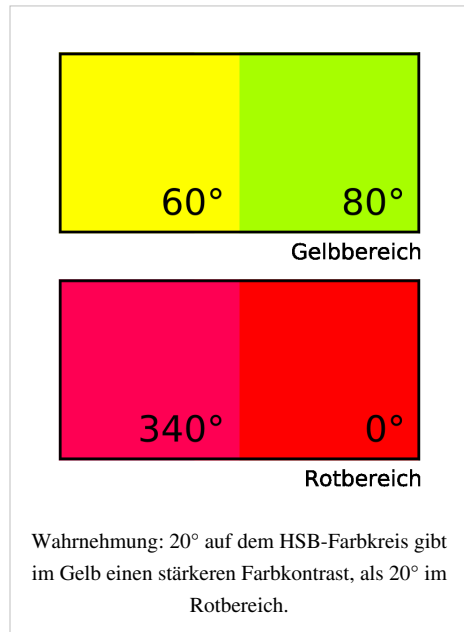
Begriff	Wirkort	Wirkart	Fachgebiet
Farbreiz	Lichtquelle	Sichtbares Licht	Physik / Optik
Farbvalenz	Auge, insbesondere Zapfen	Wahrnehmung	Physiologie
Farbempfindung	Gehirn	Erleben und Psyche	Psychologie

Farbeindruck des Menschen

Innerhalb eines Oberbegriffes Farbe (Farbigkeit) ist Farbe auch Ausdruck für die Unterscheidungskriterien dieser Qualität. Gras hat die Farbe grün, Blut hat die Farbe rot, eine Zitrone hat die Farbe gelb. Klares Glas ist farblos (ohne eigene Farbe). Diese Wahrnehmung einer Qualität eines visuellen Eindruckes entsteht vor der Benennung durch Worte.

Worte beschreiben Eindrücke: Blau, Tiefblau, Blassblau, Rotblau. Farbunterschiede kann man benennen und so kann man Wahrnehmungen austauschen. Neben dem Zeigen von materiellen Proben kann man deshalb auch durch Worte von und über Farben reden (sog. zweites Signalsystem). Dem liegt die konventionelle Übereinkunft zugrunde, von Generationen geprägt und in der Kindheit erlernt. Bei verschiedenen Menschen kann die individuelle Wahrnehmung (objektiv) gleich benannter Farben durchaus unterschiedlich sein. Diese Individualitäten gehen bis zum teilweisen oder vollständigen Ausfall von Rezeptoren, bis zur Farbenfehlsichtigkeit.

Farbnamen dienen zum gemeinsamen Verständnis über die Umwelt. Hinzu kommen weitere nichtverbale Konventionen: Rot ist an der Ampel oben, dies gilt auch für die Rot-Grün-Schwäche. Darüber beeinflussen die Farbwirkung und den Eindruck auch Farbstimmungen, die zeitliche und räumliche Vorwirkung, individuelle Erfahrung und Training der Wahrnehmung.



Farbbezeichnungen

Farbbegriffe

In allen Sprachen gibt es eine große Zahl nuancierender Wörter für einzelne Farben. Mitunter „fehlen“ in einer Sprache Farbnamen, die andere haben. Beispiele dafür sind das späte Auftreten von orange oder magenta im Deutschen. Die Wortbedeutungen unterliegen auch einem sozialen Wandel. Im Deutschen bedeutete braun im 17. Jahrhundert eher dunkelviolet bis dunkelblau, wie im Kirchenlied *Hernieder ist der Sonnen Schein / die braune Nacht bricht stark herein*. Auch der Diskussionspunkt der blauen und grünen Töne, wie im asiatischen Bereich, führt zu Irritationen bei Übersetzungen. Es bestehen ferner Ansätze, die Verfügbarkeit von Bezeichnungen für spezifische Farben als Sprachuniversal in Form einer implikationalen Hierarchie auszudrücken^[1]. Demnach verfügen etwa alle Sprachen über eine Schwarz/Dunkel- und Weiß/Hell-Distinktion, wenn sie drei Farbtermini anbieten, weiterhin über eine Bezeichnung für Rot und so weiter.

Es gibt gesonderte Farbnamen für bestimmte Einsatzzwecke, beispielsweise gilt blond nur für menschliches, falb dagegen nur für tierisches Haar.

Die emotionale Wirkung von Farbnamen nutzt die Werbung für kommerzielle Produkte, da hier Verknüpfungen zu „ansprechenden“, allgemein bekannten Gegenständen oder Situationen nutzbar sind. Die Bezeichnung *sahara* als Oberflächenfarbe von Autos steht werbewirksam symbolisch für Sehnsucht. Die Wüste Sahara in Plakat- und Fernsehbildern symbolisiert die endlose Weite und soll ein „erhebendes“, „will-es-haben“-Gelb evozieren.

Zweifellos ist durch Kulturkreis, Psyche und Erziehung eine Symbolik der Farben vorhanden, was sich mitunter in Sprichworten und Bewertungen ausdrückt. In diesem Sinne stehen Farbnamen auch für Gefühle und umgekehrt.

Bedingt durch die Einflüsse der heutigen Umwelt kennen nach einer Studie aus den 2010er Jahren heute Vierjährige soviel Farbbezeichnungen wie vor 100 Jahren Achtjährige.^[2]

Farbkoordinaten

Für die Farbdarstellung auf technischen Systemen existieren verschiedene nationale und internationale Standards und Quasi-Standards, beispielsweise die sogenannten „Webfarben“ als Teil der vom World Wide Web Consortium herausgegebenen CSS-3-Spezifikation.

Das HKS-Farbsystem oder auch der RAL-Farbkatalog bietet eine Verbindung zwischen Farbbezeichnungen und Farbdarstellung für den deutschsprachigen Raum. In Deutschland nicht so bedeutend, aber dennoch sehr gebräuchlich ist auch das Pantone-Farbsystem.

Angaben von Farbkoordinaten, als sogenannter Farbort, sind zwar wenig anschaulich aber für technische Anwendungen notwendig und unumgänglich. So lässt sich „Farbe“ umrechnen und das Farbmanagement wird überhaupt erst möglich.

Farbraum	Purpur ^[3]	Wiedergabe und Farbort
sRGB	Rot, Grün, Blau = hex{#800080}	{r=128, g=0, b=128}
CMYK	Cyan, Magenta, Gelb, Schwarz	{c=66, m=87, y=0, k=0}
HSV/ HSB	Farbton (hue), Sättigung, Hellwert (value)	{h=300, s=67, v=44}

Daraus ergibt sich aber auch die Problematik, dass zur Angabe von Farbkoordinaten auch das Farbsystem bezeichnet sein muss, um verständliche Aussagen zu machen. Speziell der Gerätefarbraum ist zu beachten. Am gleichen Bildschirm sehen die drei Balken gleich aus, so scheint der Farbton (Rot,Grün,Blau)= {#800080} für ein Purpur im RGB-System ausreichend definiert. Beim Betrachten des so erzeugten Farbreizes an verschiedenen, nahe beieinander liegenden, insbesondere *unkalibrierten* Monitoren kann allerdings unterschiedlich wirken. An LCD-Bildschirmen wirkt sogar der Betrachtungswinkel verändernd auf den wahrgenommenen Farbeindruck.

Lichtfarbe

Damit Farbe wahrgenommen werden kann, ist Licht nötig. Dieses entsteht durch Wärmebewegung von Molekülen/Atomen oder durch Änderungen in den Energieniveaus der Elektronenhülle von Atomen.

Körperfarben

Körperfarbe ist jene visuelle Wahrnehmung von Gegenständen, die durch spezifische Änderungen des remittierten Spektrums wegen Absorption stoffspezifischer Wellenlängen der optischen Strahlung oder durch Streuung von der Oberfläche reflektiert wird. In der Malerei wird der Begriff Gegenstandsfarbe genutzt und im speziellen Falle Lokalfarbe als Gegensatz zu Gesamtton. Dabei kann auch durch die Struktur der Oberfläche eine physikalisch begründete Färbung (Strukturfarben), etwa die schillernden Flecken auf den Flügeln eines Schmetterlings entstehen.

Psychische Wirkung

Reizt Licht eines bestimmten Lichtspektrums das Auge, hat das außer der einfachen Sinnesempfindung (wie „kirschrot“, „himmelblau“) komplexere und farbspezifische psychische Wirkungen im Zentralnervensystem.

Bei Menschen desselben Kulturkreises bestehen durch Tradition und Erziehung viele Gemeinsamkeiten, aber es bestehen auch individuelle Unterschiede. Solche seelischen Wirkungen der Farbwahrnehmung werden – intuitiv oder bewusst – für Effekte bei der künstlerischen Gestaltung sowie in der Mode- und Werbebranche genutzt. Dabei helfen psychologische Farbttests eine angestrebte Wirkung zu erreichen. Farbempfindung wirkt genauso wie andere Eindrücke auf die Psyche ein.

Farbttests sollen Rückschlüsse auf die Persönlichkeit der Testperson erlauben, falls sie bestimmte Farben oder Farbkombinationen bevorzugt. Allgemeiner sollen Farbttests auch Auskunft geben wie Persönlichkeiten auf welche

Farben reagieren. Psychische Farbwirkungen werden in vielen Kulturen angenommen, was sich in Sprichwörtern und Redewendungen niederschlägt. Erkenntnisse hiervon werden in der Werbung gezielt eingesetzt.

Kalt oder warm

Durch die Erfahrung ergeben sich die einfachsten Beziehungen zu den Farben, wie dies für das Temperaturempfinden gilt.

- **Warme Farben:** Die warme Jahreszeit wird von den gelben und roten Tönen bestimmt, offenes Feuer hat durch glühende Kohlenstoffteilchen diese Farben. Aus der Erfahrung und der Überlieferung gelten die Farbtöne vom Gelbgrün bis ins violette Rot hinein als „warm“.
- **Kalte Farben:** Das kalte, blaue Wasser, die türkisen Eisschatten im Winter und an Eisbergen, das „giftige“ Blaugrün wirken abweisend und kühl. Farbtöne die im Farbkreis den warmen Farben gegenüberliegen werden als „kalt“ empfunden und demgemäß kalte Farben genannt.

Farbgruppen

Die Wirkungen und symbolischen Bedeutungen von Farben, auch bezogen auf verschiedene Kulturkreise, sind in den entsprechenden Artikeln zu den Farbtönen und Unbuntfarben zu finden.

- → Rot,
- → Gelb,
- → Grün,
- → Blau,
- → Violett,
- → Cyan, → Türkis,
- → Orange,
- → Purpur, → Magenta,
- → Braun, → Oliv,
- → Weiß,
- → Grau,
- → Schwarz.

Das visuelle System

Die Arbeitsweise des visuellen Systems im Zentralnervensystem und besonders im Gehirn im Zusammenspiel mit dem Gefühlszentrum ist noch unerforscht. Andererseits ist die Wahrnehmung unterschiedlicher Wellenlängen in den Zapfen und Stäbchen der Netzhaut nicht allein für die Entstehung des wahrgenommen Bildes verantwortlich. Der Sehvorgang von Farbe und Form eines Objektes ist auch dadurch geprägt, dass das Großhirn einen Sinneseindruck mit einer dazu gehörenden Erinnerung verbindet. Die empfundene Farbe eines Objektes ist nicht immer mit der messtechnischen (da physikalischen) vergleichbar. Vielmehr ist das wahrgenommene Bild der momentan aufgenommenen Informationen überdeckt, vom Wissen zu diesem Objekt.



In der Psychologie ist der Begriff *Gedächtnisfarben* eingebürgert, wenn es um Farbwahrnehmung geht. Objekte mit einem typischen Farbton werden also unter Rückgriff auf den im Gedächtnis gespeicherten prototypischen Farbton wahrgenommen. So werden Tomaten in einem intensiverem Rot wahrgenommen als es ihrer tatsächlichen Erscheinung entspricht. Eine Wiese erscheint selbst in der Dämmerung noch grün. Auch der blaue Himmel ist solch eine Ausbildung, für die Römer war der Himmel „licht“, im Sinne von hell.

In der Farbmeterik kann diese Individualisierung zu Schwierigkeiten führen, da zwei Farben nicht zwangsläufig auch von verschiedenen Personen gleich wahrgenommen werden, wenn die Messung denselben L^*a^*b -Wert hat. Die CIE-Farbmeterik stützt sich schließlich auf Normalbeobachter mit der Statistik und der Licht- und Farbtechnik der 1920er Jahre.

Die Wahrnehmung von Farben wirkt psychologisch auf zweierlei Art.

- Farbe ruft *Assoziationen* hervor, also Vorstellungen, meistens Erinnerungen, an Dinge wie Rot=Feuer, Grün=Gras, Gelb=Zitrone. Weitere Beispiele finden sich in der Tabelle.
- Farbe ruft *Gefühle* (Farbgefühl, Gefühlston, Anmutungsqualität, Gefühlscharakter) hervor. Diese kommen zum Ausdruck, wenn man Substantive in Eigenschaftswörter verwandelt oder von vornherein Eigenschaftswörter verwendet, die am ehesten Gefühle auszudrücken vermögen, Rot=gefährlich, Grün=giftig, Gelb=frisch. Farbe kann dabei auf der Gefühlsebene vergangene Erfahrungen aktivieren.



Assoziationen und Gefühle in Folge von Farbwahrnehmung, gehen in die Traditionen der Kultur im jeweiligen Volksbereich ein. Nach der „Empiristischen Theorie der Gefühlswirkung von Farben“ werden Farbgefühle individuell und implizit (unbewusst, nicht erinnerbar) gelernt: Das sind vor allem Gefühle, die der Mensch auf Grund ererbter Triebstruktur und Daseinsthematik ursprünglich gegenüber bestimmten überall vorkommenden „Universalobjekten“ oder „Universalsituationen“ entwickelt.

- Universalobjekte: blauer Himmel, klares Wasser, grüne Vegetation, rotes Feuer, rotes Blut („als Lebenssaft“), gelbe Sonne, brauner Erdboden, braune bis graue Fäkalien, grauer Felsen, schwarze Brandreste.
- Universalsituationen sind solche, in denen sich der Mensch täglich befindet: dunkle (schwarze) Nacht, heller (weißer) Tag.

Weil die Erfahrung und die Erziehung diesen gefühlsbesetzten Dinge eine (vom Kulturkreis) bestimmte Farbe beibringt, entwickelt der Mensch Gefühle schon dann, wenn er die Farbe allein wahrnimmt. Die Reaktion auf die Farbe ist sodann bereits eingepägt: Rot alarmiert, auch wenn das vermeintlich dazu gehörende Feuer fehlt und nur die Wand des Raumes grell rot gestrichen ist. Das entspricht dem erlernten bedingter Reflexe bei Pawlows Hunden durch klassische Konditionierung.

Geschichte der Farben

Farbe ist eine auffällige Stoffeigenschaft. Bereits dem Steinzeitmenschen war diese visuelle Qualität bekannt, die allen Primaten eigen ist. Beleg für eine aktive Wahrnehmung sind die steinzeitlichen Höhlenzeichnungen, in denen Menschen die ›gesehene‹ Farbe der Natur in eigener Schöpfung mit andersartigen Farbstoffen reproduziert haben.

Handwerkliche Tätigkeit erfordert die Nachbildung von Farbvorlagen, religiöse Ansichten zur Natur führten zu philosophischen Betrachtungen über diese Stoffeigenschaft und Lichterscheinungen. Erste Anmerkungen dieser Art finden sich im klassischen China, im alten Vorderasien und besonders dann in der Antike. Das glänzende Gelb des Materials Gold, der Substanz der Götter, der Abglanz der Sonne führten zum Wunsch dies nachzugestalten. Versuche der Metallhandwerker und philosophische Ansätze zur Stoffwandlung auf Basis der Theorien der Elemente förderten den Wunsch teure Pigmente anders und billiger in gleicher „Farbe“ herzustellen. Insbesondere das „schöne“, aber teure Gold gemäß seiner „sehbaren“ Eigenschaft – der Farbe – „nachzubauen“ wurde zur Grundlage und Triebkraft der Alchemie, der hermetischen Kunst.^[4]

Theorien und Lehren zur Farbe entwickelten sich wie jede Art von Wissenschaft im Widerstreit.^[5] Für Demokrit waren rote Teilchen spitz und die grünen rund.

Im deutschen Sprachraum wirkten am stärksten die Untersuchungen und Ansichten von Johann Wolfgang von Goethe, unterstützt durch Philipp Otto Runge in seiner Gegenansicht zu Isaac Newton. Zu nennen sind Hermann von Helmholtz, Ewald Hering, Wilhelm Ostwald und auch Johannes Itten oder Harald Küppers. Bei allen Aufgeführten ist auch der pädagogische Aspekt des „Ratgebens zur Farbanwendung“ vorhanden.

Grundlage für Farben, im Sinne von Farbstoff, zur Farbgestaltung waren anfangs die Naturstoffe. Blau wurde aus sehr teurem (da seltenem) Lapislazuli-Pulver gewonnen. Der Blaufärbung von Stoffen diente die Küpe mit Indigo. Purpur aus dem Sekret der Purpurschnecke war der Farbstoff für Kaiser und Könige. Rot stammte aus der Cochenille-Schildlaus. Für Braun-, Gelb- und Rottöne wurden Erden eingesetzt. Stellvertretend sind Umbra und die Terra di Siena (Sienaerde) aus Italien zu nennen. Weiß wurde als Bleiweiß aus Blei gewonnen. Für Schwarz eignete sich Ruß als Pigment, für die schwierige Schwarzfärbung von Stoffen gab es ein besonderes Handwerk: die Zunft der Schwarzfärber. Gold hatte in der byzantinischen Malerei als Himmelsfarbe eine metaphysische Bedeutung.

Im 19. Jahrhundert wurde die Farbpalette durch neue anorganische Farbstoffe und Pigmente erweitert. Berliner oder Preußisch Blau, Rinmanns Grün, Schweinfurter Grün. Durch Imitation seltener natürlicher Farbstoffe in großen Mengen, durch industrielle Verfahren oder neu geschaffene Innovationen wurden die Färbemöglichkeiten erweitert.

Durch die organischen Anilin-Farben (Teerfarben) wurde die Anzahl der verfügbaren Färbemittel erheblich erweitert. Die natürlichen Pigmente und Farbstoffe konnten durch synthetische Farben den wachsenden Bedarf in Kunst und Wirtschaft ersetzt werden. Die alten Namen mit regionalen Bezügen blieben teilweise bis heute erhalten. Neapel-Gelb, Venezianer-Rot, Veroneser Grün sind Beispiele dafür.

Im 20. Jahrhundert wurden durch Farbfotografie und Farbdruck die Möglichkeiten der Wiedergabe von Naturvorlagen über das „Farbvolumen“ von Gemälden oder künstlerischen Grafiken (Handkoloration) hinaus erweitert. So wurde nun auch nach den Gesetzen der farbboxakten Wiedergabe geforscht. Die Entwicklung im Farbfernsehen und Digitalfotografie erlaubten wiederum verbesserte Farbwiedergaben der Naturfarben, aber die Sehgewohnheiten änderten sich ebenfalls und erforderten bessere Farbnachstellungen. Probleme bei der Umsetzung der Farben einer Vorlage vom Scanner zum Großformat für Reklamezwecke wird durch „Farbtraining“ in der Breite der Bevölkerung neu wahrgenommen.

Durch die entstehenden höheren Ansprüche der Verbraucher an die Farbwiedergabe, die neuen technischen Möglichkeiten und die Forschungsergebnisse entwickelte sich die „Messung“ der physiologischen Größe Farbe zur Farbmatrik.

Farbmodelle, Farbkataloge, Farbmessung

Farbmodelle

Es wurden verschiedene Farbmodelle entwickelt, in denen Farben *quantitativ* (mit Hilfe von Zahlen) beschrieben sind, ohne dass notwendigerweise eine Verständlichkeit der Zahlentripel mit Empfindungen vorliegt. Die Angabe ($L=75, a=5, b=33$) ruft nicht explizit eine Wahrnehmung einer Farbe hervor. Im Farbmodell wird jede enthaltene Farbe als Punkt innerhalb eines (oft) dreidimensionalen Farbraumes dargestellt – dessen maximaler Umfang sich nach der *Reinheit* der jeweiligen Grundkomponenten richtet. Die Modelle sind durch den Anwendungsfall bedingt und begrenzt, deren Farbraum sollte alle in der jeweiligen Technik möglichen Farben umfassen. Für den Fall, dass in einem Farb-Workflow unterschiedliche Techniken der Farbproduktion verwendet werden, können diese nur bedingt ineinander umgerechnet werden. Teilweise sind nicht-lineare Beziehungen möglich, meist handelt es sich aber um Matrizen mit Stützstellen, zwischen denen dann linear interpoliert werden muss. Unterschiedliche Farbräume sind nicht deckungsgleich – die Farben können deshalb oft nur relativ zueinander, nicht jedoch absolut gleich reproduziert werden. Der wichtigste Fall ist die Abbildung des RGB-Farbraumes (Farben am Monitor designt) auf den CMYK-Farbraum der Druckfarben.

Anders das CIE-Lab-Modell, das auf Untersuchungen der menschlichen Farbwahrnehmung basiert, so dass darin alle vom Menschen wahrnehmbaren Farben enthalten sind. Deshalb wird „Lab“ oft in der Farbproduktion als Referenzfarbraum verwendet, über den die anderen Farbräume definiert werden.

Einige Farbräume

- RGB – Grundfarben: Rot, Grün und Blau in Anteilen
- CMYK – Komponenten: Cyan, Magenta, Gelb (yellow) und Schwarz (key)
- HSV – Werte: Farbton (hue), Sättigung (saturation) und Stärke (value)
- CIELab – Grundwerte: L (lightness) und die abstrakten Werte a (rot-grün) und b (gelb-blau)
- XYZ: Ausgangsfarbkörper der CIE/IBKCIE (Normfarbraum).
- YUV (analoges PAL und analoges NTSC), YDbDr im analogen SECAM, YIQ veraltet, früher verwendet für analoges NTSC
- YPbPr (analoges HDTV und analoges Component Video)
- YCbCr (digitales PAL/SECAM, digitales NTSC, DVB, JPEG, MPEG, DVD-Video)

Farbkataloge

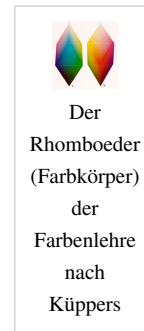
Neben diesen nur mathematisch definierten (quasi stetigen) Farbräumen gibt es auch Mustersammlungen, in denen materielle Proben von definierten Farbtönen enthalten sind, diese werden je nach Branche als Mappen oder Muster ausgegeben. Letztlich bildet die Gesamtheit der Abmischungen aus verschiedenen Pigmenten in der Oberflächenfärbung (Druckindustrie) oder der Durchmischung mit Pigmenten oder Farbstoffen (Kunststoff-, Textilindustrie) eines Farbkataloges ebenfalls eine dreidimensionale Wiedergabe, möglicherweise nur einer Ebene. Beispiele dafür sind:

- Pantone
 - HKS
 - Hexachrome
 - RAL
 - NCS
-

Übergänge zwischen Farbräumen

Da in Farbkatalogen meist Farbwerte im dreidimensionalen System beigelegt sind und Farbwerte der verschiedenen Modelle definiert sind können diese ineinander umgerechnet werden. Wegen des jeweils unterschiedlichen Farbumfangs der zugeordneten Farbräume sind die Umrechnungsergebnisse besonders in Randbereichen nicht immer ausreichend. Um eine gute Näherung zu finden, bedient man sich der Farbnachstellung am jeweiligen Zielsubstrat.

- Die Additive Farbmischung: Wenn alle Werte auf Null Prozent stehen, dann ist der Monitor dunkel. Wenn alle Werte auf 100% stehen, dann ist der Monitor weiß und hell erleuchtet. Typischerweise wird rot, grün und blau in unterschiedlichen Anteilen gemischt (RGB).
- Die Subtraktive Farbmischung: Wenn alle Werte auf Null Prozent stehen, dann bleibt das leere Blatt Papier weiß. Wenn alle Werte auf 100% stehen, dann ist die resultierende Farbe schwarz. Auf dieser Basis arbeiten Drucker. Typisch sind die Farben Cyan, Magenta und Yellow (CMY), in verbesserter Form kommt noch Schwarz hinzu.
- Die Integrierte Mischung wurde von Küppers in seiner Farblehre vorgeschlagen, um den Streufaktor von Körperfarben zu beachten, der bei der subtraktiven Farbmischung unbeachtet bleibt.^[6] Neben der Absorption der Farbschichten ist die Streuung in realen Oberflächen farbbeeinflussend, einen theoretische Betrachtung und rechnerischen Ansatz liefert die Kubelka-Munk-Funktion.



Spektral- und Mischfarben

Spektralfarbe

ist jener Eindruck der durch den Reiz eines Ausschnitts des sichtbaren Spektrums entsteht. Eine geeignete Methode hierfür ist die Zerlegung weißen Lichts durch ein Prisma oder ein Streugitter. Die Intensität und auch der Eindruck der Spektralfarbe ist von der Breite des Wellenlängenintervalls abhängig, also auch die Reinheit der Spektralfarbe. Andererseits repräsentieren die einzelnen Wellenlängen des Spektrums im sichtbaren Licht nur einen kleinen Teil möglicher *Farben*. Zu bemerken ist: Im Regenbogen sind zwar die Spektralfarben, aber nicht deren Mischungen zu sehen. Besonders Farben der „Purpurlinie“ zwischen Violett und Rot können nicht als Spektralfarbe auftreten, es sind Valenzfarben.



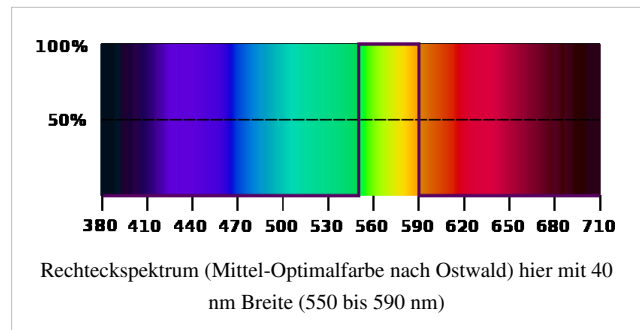
Mischfarben

sind alle Farbtöne, die durch Farbmischung entstehen, gleichgültig ob dies durch Mischung von Strahlen (Bildschirm) oder beleuchtete reflektierende Flächen (Druckerzeugnisse) erfolgt. Bestimmte Mischfarben können dem menschlichen Auge durch Metamerie als identisch erscheinen, obwohl die Intensität des reizenden Lichtes an

verschiedenen Stellen der Wellenlängenskala ungleich ist. Metamerie ist ihrerseits von der Beleuchtungsquelle abhängig, dieser Effekt liegt darin begründet, dass das (quasikontinuierliche) Spektrum der das Auge treffenden Strahlung (Farbreiz) auf nur drei wahrnehmende Zapfentypen abgebildet wird.

Optimalfarben

sind nach Wilhelm Ostwald idealisierte Spektralfarben von endlicher Breite des Intervalls der Wellenlänge, bei denen nur die Intensität 0 % und 100 % existiert. Eine Optimalfarbe ist eine Körperfarbe, deren Remissionskurve $\beta(\lambda)$ eine rechtwinklige Kurve, es sind nur die Remissionsgrade $\beta(\lambda)=0$ und $\beta(\lambda)=1$ erlaubt und maximal zwei Sprungstellen im sichtbaren Bereich. Es gibt es nur vier Optimalfarbtypen:



- Kurzendfarben (kurzwellige Seite ist 1): Blau
- Langendfarben (langwellige Seite ist 1): Rot
- Mittelfarbe (am lang- und kurzwelligen Ende keine Remission): Grün
- Mittelfehl Farbe (Remission an beiden Enden 1, aber keine Remission in der Mitte): Veil, die Purpurfarben

Der (beigefügte) erläuternde Farbname dient nur der Erläuterung und ist je nach der Breite des Bereichs der vollen Remission zu verstehen. Eine Langendfarbe, die bis nahezu zum kurzwelligen Ende des sichtbaren Spektrums reicht, ist ein strahlendes Weiß mit blauem Stich, Entsprechendes gilt für die anderen Typen. Andererseits ist ein nur schmaler Streifen einer Mittelfarbe Schwarz, bestenfalls Schwarz mit Farbstich.

Eine ungefähre Darstellung von Farben findet sich im jeweils zugehörigen Artikel. Eine Darstellung von Spektralfarben am Monitor ist auf Grund der unterschiedlichen Erzeugung der Strahlung und der damit verbundenen ungleichen spektralen Verteilung nur annähernd möglich. Hierzu sei auf den Hinweis am Ende verwiesen. Eine ungefähre Zuordnung von Spektralfarben zu sRGB-Werten findet sich unter Weblinks.

Farbton, Helligkeit, bunte und unbunte Farben

- Die Alltagssprache gibt Schwarz und Weiß als „Farben“ wieder, bezeichnet sie aber nicht als *farbig*. Mitunter nutzt man die Bezeichnung unbunte Farben, um die neutrale Grauskala zu definieren.
- Zwischen dem Farbstich und der *Sättigung* liegen die *bunten Farben*, die einen zunehmenden Farb-(also Bunt-)eindruck hinterlassen.

Diese Unterscheidung ist begründet in der Farbwahrnehmung:

- Rezeptoren zur Wahrnehmung sind die **Zapfen**, die im menschlichen Auge in drei Wahrnehmungsqualitäten existieren. Je nach Energie der einfallenden Photonen (entsprechend der optionalen Wellenlänge) wird durch eine chemische Reaktion ein elektronischer Reiz aktiviert, dieser geht an den Sehnerv. Aus dem Verhältnis der unterschiedlichen Reizung der drei empfangenden Zapfen nehmen wir eine *farbtongleiche Wellenlänge* wahr, den *Farbton*. Je nach Intensitätsverteilung der Reize nehmen wir die Farben als gesättigt oder verblasst wahr. Dieses ursprüngliche Signal wird in der Dreifarben-Theorie zugrunde gelegt. Von Hering stammt dagegen die Vierfarben-Theorie, die von Gegenfarbpaaren „Grün-Rot“ und „Gelb-Blau“ ausgeht und die eher die vom Sehnerv geleiteten und im Großhirn wahrgenommenen Zusammenhänge als die außerhalb des Körpers zu findende physikalische Situation beschreibt. *Grau*, *Weiß* oder *Schwarz* ergeben sich dabei als Wahrnehmungen wenn alle 3 Zapfen in nahezu gleicher Quantität erregt werden, also keine wesentlichen Unterschiede in Nervensignal vorliegen. Die Farbdimensionen *Farbintensität* und Farbsättigung sind somit auf die Stärke der Reize zurückzuführen. Letztlich kann man diese Zusammenhänge als Gesetz des Sehens formulieren.
- Die **Stäbchen** sind lichtempfindlicher als die Zapfen. Wenn die Menge der Photonen pro Zeiteinheit nachlässt, werden nur die Stäbchen erregt, ihr Reiz im Sehnerv weitergeführt. Bei schwachen Lichtverhältnissen

(Nachtsehen), in denen die Farbzapfen keinen Reiz auslösen, geht an das Gehirn nur Information über die Beleuchtungsstärke. Diese Informationen sind im ursprünglichen Wortsinn „farb-los“ (*dunkel*), es entsteht ein „grau“-Eindruck (*Nachts sind alle Katzen grau*).

- Wenn die Menge der einfallenden Photonen die Wahrnehmungsschwelle auch der Stäbchen-Zellen unterschreitet entsteht der Eindruck „Schwarz“ (*Finsternis*), physiologisch besser als Eigengrau benannt.
- Übermäßige Helligkeit (bei *Glanz*, oder bei Blick in die Sonne), also hohe Anzahl von Photonen überreizt beide Sehsysteme durch *Blendung*. Das „blendende“ *Weiß* verursacht Schmerz als Warnreaktion des Körpers. Da das Sehpurpur nicht ausreichend schnell rekombiniert, kann bei intensiven Blendungen vorübergehende Blindheit eintreten.

Anzumerken bleibt, dass die Zapfen und Stäbchen entwicklungshistorisch auf die gleichen lichtreagierenden Ausgangszellen zurückgehen. Diese Entwicklung führte dazu, dass das Wahrnehmungsspektrum anderer Tierarten vom menschlichen abweicht. Bienen sind im Ultravioletten besser ausgerüstet, ihre Sehzellen nehmen kurzwelligere Strahlung (energiereichere Photonen) wahr, als der Mensch. Bei Vögeln hat sich die Kontrastwahrnehmung zwischen roten Früchten und grünem Laub als wichtiger erwiesen. Für Fische ist die bessere Wahrnehmung von kurzwelliger Strahlung nötig, da langwellige Anteile des Sonnenlichtes durch Wasser absorbiert werden.

Farbsehen der Tiere

„Farbe“ ist auf das Sehen der Tiere nur im übertragenen Sinn des Wortes möglich.

Die komplexe Natur des Phänomens Farbe ist schließlich auch Grundlage für unterschiedliche Abstraktionsebenen und scheinbar widersprüchlichen Aussagen. Ein Beispiel hierzu findet sich unter Purpurlinie.

- Physikalische Betrachtung als Wellenlänge des Lichtes (Energie der Photonen),
- Dreidimensionaler Farbreiz durch die Wirkung auf die Zapfen (Dreifarbentheorie), die zu 3 Primärvalenzen im CIE-Normfarbraum führt.
- Vielschichtige Wirkung der wahrgenommenen Farbe im Bewusstsein, was sich als Lab-Farbraum mit gleichabständigen Farben in der Farbtheorie darstellt.
- Die Interpretation der wahrgenommenen Farbe und ihre Wirkung durch und auf die Psyche: Farbenlehre, Harmonielehre, Farbtypenlehre.

Siehe auch

- Grundbegriffe
 - Komplementärfarbe
- Farbwiedergabetechnik
 - Mehrfarbendruck
 - Synästhesie
 - Farbe und Computer
 - Farbtiefe
- Physikalische, chemische und biologische Aspekte
 - Emission, Transmission
 - Farbtemperatur
 - Schwarzlicht
 - Anstrichfarbe
 - Bodenfarbe
 - Farbige Schatten
 - Flammenfärbung

Literatur

- Harald Braem: *Die Macht der Farben*, Langen/Müller, 2003, ISBN 3-7844-7156-0.
- Eva Heller: *Wie Farben auf Gefühl und Verstand wirken*. Knaur, Droemer 2000. ISBN 3-426-27174-5.
- Hans Gekeler: *DuMont's Handbuch der Farbe (Systematik und Ästhetik)*. DuMont, Köln 1988. ISBN 3-7701-2111-2
- Rolf Gierling: *Farbmanagement*. 3. Auflage. MITP: Bonn, 2006. ISBN 3-8266-1626-X.
- Johann Wolfgang von Goethe: *Zur Farbenlehre*. Cotta, Tübingen 1810.
- Johannes Itten: *Kunst der Farbe*, Otto Maier, Ravensburg 1970, ISBN 3-473-61551-X.
- Harald Küppers: *Die Logik der Farbe*. 2.Auflage. Callwey., München 1981. Theoretische Grundlagen der Farbenlehre. ISBN 3-7667-0601-2
- Horst O. Mayer: *Einführung in die Wahrnehmungs-, Lern- und Werbepsychologie*. Oldenbourg 2005, ISBN 3-486-57675-5.
- Emil Ernst Ploß: *Ein Buch von alten Farben. Technologie der Textilfarben im Mittelalter mit einem Ausblick auf die festen Farben*, Heidelberg und Berlin 1962, Neudruck München 1967
- Petra E. Weingart, Rudolf Forster, : *Ich und die Farbe sind eins*. Kovac, Hamburg 2005, ISBN 3-8300-1813-4.
- Norbert Welsch, Claus Chr. Liebmann: *Farben*. Spektrum, 2004. ISBN 3-8274-1563-2.

Weblinks

Allgemein

- colorsystem.com ^[7] (Farbe und Kultur, Farbsysteme)
- Programme zu Farbenlehre und Farbwahrnehmung ^[8]
- Eine Farbtabelle sortiert nach Schattierungen ^[9]
- Küppers' Farbenlehre ^[10]
- Farbnamen: eigene Kenntnis testen ^[11]
- Farbe und Form im Bauhaus ^[12]
- Colour and Vision Research Labs: Farbwerte, Spektralwerte und Tristimulus-Werte ^[5]
- Das Farbspektrum in Webfarben (sRGB) unter Angabe der Wellenlängen ^[13]

Übersichtsartikel

Farbimpulse – Onlinemagazin für Farbe ^[14]

- Aktuelle Informationen zum Thema »Farbe« (en) ^[15]
 - Barry Maund: Eintrag ^[16] in der *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (englisch, inklusive Literaturangaben)
 - Eric M. Rubenstein: Eintrag ^[17] in der *Internet Encyclopedia of Philosophy* (englisch, inklusive Literaturangaben)
 - Sammlung von Online-Aufsätzen zu den Themen Farbe und Farbwahrnehmung ^[18], zusammengestellt von David Chalmers
 - Artikel über Strukturfarben auf www.naklar.at ^[1]
-

Einzelnachweise

- [1] cf. <http://typo.uni-konstanz.de/archive/nav/browse.php?number=613>
- [2] Studie von Martin Oswald von der Pädagogischen Hochschule Weingarten. Vortrag auf der Konferenz „Farbe in der Bildung“, Deutsches Farbenzentrum und Universität Halle-Wittenberg
- [3] W3C TR CSS3 Color Module, HTML4 color keywords (<http://www.w3.org/TR/css3-color/#html4>)
- [4] Reinhard Federmann: *Die königliche Kunst (Eine Geschichte der Alchemie)*. Paul Neff, Wien Berlin Stuttgart 1964, ohne ISBN
- [5] Gerd Boßhammer: *Technologische und Farbrezepte aus dem Kasseler Codex medicus 4° 10. Untersuchungen zur Berufssoziologie des mittelalterlichen Laienarztes*, Würzburg 1977 (= Würzburger medizinhistorische Forschungen, 10)
- [6] Harald Küppers: *Die Logik der Farben*, Callway:1981, ISBN 3-7667-0601-2
- [7] <http://www.colorsystem.com/grundlagen/aad.htm>
- [8] <http://www.solstice.de/physikprogramme/farbenlehre/programme-zur-farbenlehre.html>
- [9] <http://www.farb-tabelle.de>
- [10] <http://www.uni-bielefeld.de/lili/kumu/farbenlehre-kueppers/de/>
- [11] <http://www.farbnamen.ch>
- [12] http://www.g-haase.de/my_bauhaus.html
- [13] <http://www.magnetkern.de/spektrum.html>
- [14] <http://www.farbimpulse.de/>
- [15] <http://www.farbportal.de/>
- [16] <http://plato.stanford.edu/entries/color/>
- [17] <http://www.iep.utm.edu/color/>
- [18] <http://consc.net/online1.html#color>



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Farbenblindheit

Klassifikation nach ICD-10

H53.5	Farbsinnstörungen - Farbenblindheit
H54.0 oder H54.2	Blindheit und Sehschwäche - Blindheit beider Augen (H54.0, Sehschärfe <0,05) - Sehschwäche beider Augen (H54.2, Sehschärfe >0,05)

ICD-10 online (WHO-Version 2006) ^[1]

Die **Farbenblindheit**, **Achromatopsie** oder **Achromasie** ist eine seltene Farbsinnstörung, bei der keine Farben, sondern nur Kontraste (hell-dunkel) wahrgenommen werden können. Bei der *okulären (oder angeborenen) Achromatopsie* ist die Störung des Sehens in der Netzhaut, mithin im Auge, lokalisiert, bei der *cerebralen (oder erworbenen) Achromatopsie* liegt eine neurologische Störung der Farbwahrnehmung vor.

Der Begriff *Farbenblindheit* ist oft irreführend, da umgangssprachlich die Rot-Grün-Blindheit als Farbenblindheit bezeichnet wird. Bei dieser Erkrankung handelt es sich jedoch lediglich um eine Farbenfehlsichtigkeit (Farbenanomalie), die bei 5 % der Bevölkerung (überwiegend Männern) vorliegt. Im medizinischen-gutachterlichen Bereich wird meist nicht scharf zwischen der Behinderung *Achromatopsie* und der Funktionseinschränkung *Farbenfehlsichtigkeit* unterschieden. Beide Erkrankungen werden gemeinsam unter dem gleichen ICD-Diagnoseschlüssel 53.5 (Farbsinnstörungen) gelistet, wobei die Achromatopsie medizinisch als vollständiger *Ausfall des Farbsinns* mit resultierenden weiteren relevanten Symptomen (geringe Sehschärfe, extreme Blendungsempfindlichkeit) einzugruppieren ist.

Krankheitsbild

Es gibt drei Varianten der Farbenblindheit, die auf unterschiedliche Weise entstehen.



Originalbild eines Normalsichtigen



Simulation Achromatopsie

Die Sicht eines Achromaten kann für Normalsichtige technisch nicht dargestellt werden!

Die Simulation berücksichtigt folgende Bedingungen: vollständige Farbenblindheit, Blendungskomponente durch Tageslicht, 5–10 % Sehschärfe

Die *totale Farbenblindheit* ist eine autosomal-rezessive Erbkrankheit der Netzhaut. Frauen und Männer sind gleich häufig betroffen. Die betroffenen Menschen (ca. 1/100.000) können nur Graustufen unterscheiden und werden auch als Achromaten bezeichnet, die Ursache ist die *Achromatopsie*. Sie leiden zusätzlich unter mangelnder Sehschärfe und Überempfindlichkeit gegen helles Licht. Es gibt ca. 3000 Personen mit Achromatopsie in Deutschland.

Eine der Achromatopsie ähnliche Erkrankung ist die Blauzapfen-Monochromasie, bei der noch eine größere Restsichtigkeit im Blaubereich besteht und die X-chromosomal vererbt wird (Genort Xq28).

Die Farbenblindheit kann auch als *cerebrale Achromatopsie* auftreten, etwa nach einem Schlaganfall, Schädel-Hirn-Trauma oder anderen Gehirnläsionen. Es handelt sich somit um eine *erworbene Farbsinnstörung*. Die Ursache liegt nicht im Auge als Sinnesorgan selbst, sondern in der gestörten Verarbeitung der Sinneswahrnehmung „Farbe“. Die Sehschärfe ist normal, da die Farbsinneszellen normal funktionieren und die Kantenerkennung und Flächentrennung, die in vorgeschalteten Gehirnarealen erfolgt, ist intakt.

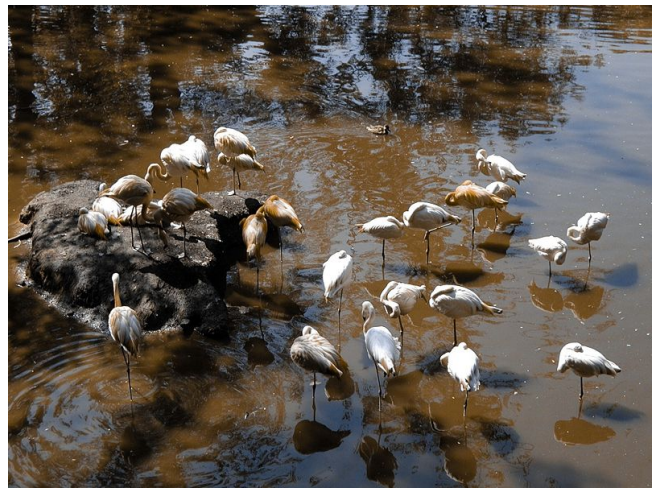
Okuläre (angeborene) Achromatopsie

Ursache

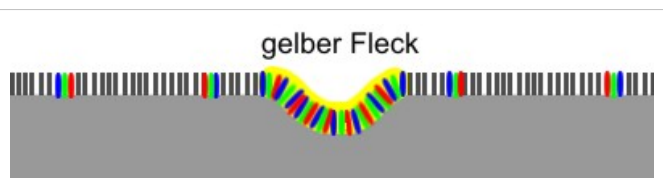
Die Farb-Rezeptoren (Zapfen) in der Netzhaut des Auges ermöglichen die farbliche Wahrnehmung der Umwelt. Von diesen Farbrezeptoren gibt es drei Arten, die die Farbreize aufnehmen und weiterleiten. Bei Achromaten funktioniert keine dieser Zapfenarten, sie können somit keine Farben erkennen.

Dieses Sehen ist auch für scharfes Farbsehen am Tage nötig, damit ist photopisches Sehen nicht möglich. Achromaten verfügen nur über Stäbchen-Rezeptoren, die für skotopisches Sehen ausgelegt sind. Diese Hell-Dunkel-Rezeptoren ermöglichen beim Normalsichtigen das Dämmerungssehen, da sie lichtempfindlicher sind als die Farbrezeptoren. Am hellen Tage leiden Achromaten dadurch unter einer extremen Blendungsempfindlichkeit. Bei hellem Licht sind ihre Stäbchen überlastet, wodurch die schwache Sehkraft fast völlig zurückgeht.

Der Achromat sieht nur ein nebliges Weiß/Grau. Deswegen wird die Erkrankung auch "Tagblindheit" genannt. An der Stelle des schärfsten Sehens der Netzhaut (gelber Fleck) befinden sich bei gesunden Menschen ausschließlich Zapfen und keine Stäbchen. Bei Achromaten befinden sich in der „Mitte“ der Netzhaut keine funktionierenden Sinnesrezeptoren. Durch die schlechte zentrale Sehschärfe kommt es bei der Achromatopsie zu einem Nystagmus, einem unwillkürlichen und vom Betroffenen selbst nicht wahrgenommenen Augenzittern.



Vergleich: Farbenfehlsichtigkeit (Deuteranopie=Grünblindheit)
Falschfarbenbild bei normaler Sehschärfe



Netzhaut eines Gesunden
Stäbchen und drei Arten Zapfen



Netzhaut eines Achromaten
ausschließlich Stäbchen und keine Zapfen

Klinische Symptome

In der Regel liegen bei Betroffenen vier Symptome vor:

- Fast vollständige oder vollständige Farbenblindheit, da aufgrund des genetischen Defektes keine funktionstüchtigen Zapfen vorhanden sind.
- Augenzittern (Nystagmus), da im gelben Fleck (Ort des schärfsten Sehens zentral in der Netzhaut) keine funktionstüchtigen Sehzellen existieren (siehe Schema der Netzhaut bei Gesunden und Achromaten) und dieser Defekt durch schnelle Augenbewegungen ausgeglichen werden soll.
- Überempfindlichkeit für Licht: Photophobie. Stäbchen sind für geringere Lichtmengen (Dämmerung) konzipiert. Da keine funktionstüchtigen Zapfen vorhanden sind, ist eine Hemmung der Stäbchen bei Helligkeit im Gegensatz zu nicht-farbenblinden Personen nicht möglich.
- Erheblich eingeschränkte Sehschärfe (Visus), da Stäbchen in geringerer Dichte im zentralen Gesichtsfeld angeordnet sind.

Diagnostik

- Mittels eines Elektroretinogrammes (ERG) lassen sich die Funktion der Stäbchen-Rezeptoren (Dämmerungssehen) und Zapfen-Rezeptoren (Farbsehen) im Auge getrennt beurteilen. Dabei werden Lichtblitze auf die Netzhaut projiziert; die Reaktionen der Sinneszellen (Stäbchen und Zapfen) werden durch Elektroden abgeleitet.
- Durch eine Blutanalyse ist es möglich, die Achromatopsie-Gene zu untersuchen (siehe unten)

Genetik

Bekannte Mutationen

- CNGA3-Gen (ACHM2=Achromatopsia 2=Rod Monochromatism 2):
 - 20-30% der Achromatopsie-Patienten haben Mutationen in diesem Gen
 - Defekt: Cyclic-nucleotide-gated cation channel alpha 3 = alpha-subunit of the cone photoreceptor cGMP-gated cation channel
 - Folge: komplette und inkomplette Achromatopsie
 - Genort: 2q11
- CNGB3-Gen (ACHM3=Achromatopsia 3=Pingelapese Achromatopsia= Pingelapese Blindness)
 - 40-50% der Achromatopsie-Patienten haben Mutationen in diesem Gen
 - Defekt: Cyclic nucleotide gated channel beta subunit = beta-subunit of the cGMP-gated cation channel
 - Genort: 8q21-q22
- GNAT2-Gen:
 - Defekt: cone photoreceptor-specific alpha subunit of transducin
- weitere chromosomale Genlokalisierung: ACHM1-Gen

Vererbung

Konstellation der Eltern	Wahrscheinlichkeit für Kinder mit Achromatopsie	Wahrscheinlichkeit für gesunde Kinder
zwei gesunde Personen, davon: <ul style="list-style-type: none"> ein gesunder Nicht-Gen-Träger und ein gesunder Gen-Träger (heterozygot) 	0 %	100 % <ul style="list-style-type: none"> 50% tragen das Gen (klinisch gesund, aber Überträger) 50% haben kein Achromatopsie-Gen
zwei gesunde Personen, davon: <ul style="list-style-type: none"> beide Träger eines Achromatopsie-Gens (heterozygoter Merkmals-Träger) 	25 %	75 % <ul style="list-style-type: none"> 50% tragen das Gen (klinisch gesund, aber Überträger) 25% haben kein Achromatopsie-Gen
ein klinisch gesunder Gen-Träger (heterozygot) und ein Achromat (homozygot)	50 %	50 % <ul style="list-style-type: none"> alle Kinder tragen ein Achromatopsie-Gen
ein klinisch gesunder Nicht-Gen-Träger und ein Achromat (homozygot)	0 %	100 % <ul style="list-style-type: none"> alle Kinder tragen ein Achromatopsie-Gen
zwei Achromaten (zwei homozygote Genträger)	100 %	0 %

Spezielle Probleme von Achromaten

Die Alltagsprobleme der Achromaten sind in erster Linie von der hohen Blendungsempfindlichkeit beeinflusst. Die ohnehin geringe Sehschärfe wird schon bei mäßigem Licht weiter stark reduziert. Ein Wechsel der Lichtverhältnisse bedingt meist auch einen Brillenwechsel (angepasste Tönung oder Kantenfilter). Die fehlende Möglichkeit, Farben zu unterscheiden, führt zudem im stark *farb-codierten* Alltag zu Schwierigkeiten.

Therapie

Für die irreversible angeborene Störung der Netzhaut ist eine Therapie derzeit nicht möglich.

Spezifische Hilfsmittel

Die Hilfsmittel sind nach den Sehproblemen in drei Gruppen unterteilt: Minderung der Blendung, Kompensation der geringen Sehschärfe, Ausgleich des fehlenden Farbsehens.

- Zur Reduzierung der Blendung sind Kantenfilterbrillen oder getönte Kontaktlinsen erforderlich. Es werden auch Hilfen wie Brillen mit Blendschutz gegen seitlich einfallendes Licht oder Schirmmützen verwendet. Kantenfilterbrillen müssen je nach Lichtbedingungen gewechselt werden.
- Zur Kompensation der geringen Sehschärfe werden Vergrößerungshilfen benutzt. Dies sind optische oder elektronische Lupen, monokulare Fernrohre, elektronische (Tafel-) Lesegeräte, Lupenbrillen oder Brillen mit integrierten Lupensegmenten.
- Probleme auf Grund schlechten Erkennens von Farben lassen sich teilweise durch elektronische Farberkennungsgeräte verringern.
- Ein neuartiges Hilfsmittel ist das Eyeborg, das mithilfe einer Kamera Farbinformationen in akustische Signale umwandelt.

Weblinks

- Achromatopsie-Informationssseite ^[2]
- Achromatopsie-Netz ^[3]
- RetinaScience: Stäbchenmonochomastien ^[4]
- Simulation von Farbenblindheit für Webseiten ^[5] (englisch)
- Liste mit Farbsehtests ^[6] (englisch)

Referenzen

- [1] <http://www.dimdi.de/dynamic/de/klassi/diagnosen/icd10/htmlamtl2006/fr-icd.htm>
- [2] <http://www.achromatopsie.de>
- [3] http://www.achromatopsie.net/achromatopsie_netz.htm
- [4] http://retinascience.de/ausgabe/index.php?nav=info&S_ID_1=109&S_ID_2=117&S_ID_3=51
- [5] <http://www.vischeck.com/vischeck/vischeckURL.php>
- [6] <http://www.copresco.com/links/colblind.htm>

Farbenlehre

Die **Farbenlehre** befasst sich mit folgenden Themenbereichen:

- Entstehung des Farbreizes
- Gesetze der Farbmischung
- Ordnung der Farben in mathematischen Systemen
- Farbvalenzmetrik
- Wirkungen von Farben auf den Betrachter
- Historische Darstellung der Entwicklung der Erkenntnisse

Sie ist die Lehre der Erscheinungsweise **Farbe**, die von der Lehre über Farbmittel (das sind Pigmente und Farbstoffe) zu trennen ist.

Forschungs- und Tätigkeitsfelder

Im wesentlichen gehen die bestehenden Farbenlehren und Farbtheorien von zwei unterschiedlichen Schwerpunkten aus. Diese widersprachen sich teilweise in der Geschichte, ergänzen sich aber zunehmend durch umfassenderes Verständnis der Forschungsergebnisse aus Physik (Elektromagnetismus und Optik), Physiologie und Psychologie, der chemischen Grundlage der Farbmittel und den daraus resultierenden Erklärungs- und Interpretationsmodellen in Verbindung mit vielfältigen künstlerischen Auffassungen.

- Physik: Ein Schwerpunkt lag auf der Erforschung der physikalischen Abläufe, auf denen die optischen Gesetze der lichtoptischen Farberscheinungen beruhen. Dabei bildet die wellenlängenabhängige Wirkung des sichtbaren Lichtes im Kontext der elektromagnetischen Wellen die Grundlage der Untersuchungen.
- Kunst: Seit jeher bemühen sich Künstler, insbesondere Maler, um das Verständnis der Farbphänomene. Hierbei stehen die Wirkung auf den Betrachter und Theorien über das Zusammenspiel der Farben im Mittelpunkt.
- Physiologie und Biologie: Im historischen Verlauf erklärten Physiologen, wie durch Licht hervorgerufene Reize von der biologischen Entität (Pflanze/Tier/Mensch) aufgefangen, im biologischen Organismus weitergeleitet, verarbeitet und „erkannt“ werden. Schwerpunkt der Forschung ist hier der „Apparat“ in Mensch, Tier und auch Pflanze, während und nach der Aufnahme von Lichtreizen. Dabei wird auch das ultraviolette (Wellenlänge unterhalb 380 nm) und infrarotes Licht (Wellenlänge oberhalb 780 nm) in die Untersuchung einbezogen.
- Psychologie: Daraus resultieren physiologische und psychologische Wirkungen des Körpers und der Psyche. Letztere werden von Psychologen untersucht, deren Ergebnisse beispielsweise in der Farbtherapie und der

Innenarchitektur praktisch umgesetzt werden.

Von Farblehren spricht man im Sinne der unterschiedlichen Interpretationen dieser Wissensgebiete. Grundlegend ist der Unterschied zwischen den wahrnehmbaren Farben (vom Farbreiz zur Farbvalenz), die durch Lichtquelle (bunte Lichter) realisiert sind, und jenen komplexeren Vorgänge durch chemisch beschränkte Farbmittel (Pigmente) darstellbarer Farben. Im ersten Falle nimmt das „Individuum“ jenes vom Strahler ausgehende emittierte Licht wahr. Im zweiten Falle steht zwischen Lichtquelle und dem wahrnehmenden Sinnesorgan noch eine absorbierende Fläche mit (chemisch-physikalisch definierbaren) Farbkörpern (Gamut). Die Abläufe im „Individuum“ eher physikalisch-vordefiniert oder eher „seelisch“-wahrnehmend individualisieren die Farbwirkung.

Eine besondere Form der Farbenlehre ist die Harmonielehre, die sich mit dem Zusammenspiel von Farben (Farbtönen) befasst. Dieses Zusammenspiel ist stark vom Kulturkreis, individueller Erfahrung und der künstlerischen Absicht beeinflusst. Wesentliche Schöpfer von Farblehren sind auch Vertreter von Harmonielehren oder flochten Betrachtungen zu Farbharmonie in ihre Farbenlehre ein. (Goethe, Ostwald, Küppers)

Farbforscher und Farblehrer

Den theoretischen Unterbau zur Erfassung, Verarbeitung, Ein- und Zuordnung von Farbphänomenen und Farbprinzipien (Einfärbeprinzipien) sowie deren Anwendung auf unterschiedlichen Tätigkeitsfeldern lieferten, je nach Forschungsschwerpunkt, einige heterogene Farbenlehren^[1]. Chronologisch nach Geburtsjahr sortiert folgen Persönlichkeiten, die die Entwicklung der Farblehre forcierten (weitestgehend Deutsche berücksichtigt, deshalb der Hinweis, dass Farblehrer auch in Frankreich und den angloamerikanischen Ländern arbeiteten).

- Leonardo da Vinci (1452-1519) Maler
- Athanasius Kircher (1602-1680) Jesuiten-Pater
- Isaac Newton (1643-1727) Physiker
- Tobias Mayer (1723-1762) Kartograf
- Johann Heinrich Lambert (1728-1777) Mathematiker, Physiker
- Christian Ernst Wünsch (1744-1828) Mathematiker, Mediziner
- Matthias Klotz (1748-1821) Maler
- Johann Wolfgang von Goethe (1749-1832) Schriftsteller, Universalgelehrter
- Philipp Otto Runge (1777-1810) Maler
- George Field (Chemiker) (1777-1854) Chemiker
- Eugène Chevreul (1786-1889) Farbchemiker
- Jan Evangelista Purkyně (1787-1869) Sinnesphysiologe
- Arthur Schopenhauer (1788-1860) Philosoph
- Gustav Theodor Fechner (1801-1887) Mediziner, Naturphilosoph
- Hermann von Helmholtz (1821-1894) Physiker, Universalgelehrter
- Wilhelm Wundt (1822-1920) Physiologe
- Ewald Hering (1834-1918) Physiologe
- Wilhelm von Bezold (1837-1907) Farbenphysiker
- Wilhelm Ostwald (1853-1932) Universalgelehrter
- Adolf Hölzel (1853-1934) Maler
- Albert Henry Munsell (1858-1918) Maler
- Georges Seurat (1859-1891) Maler
- August Kirschmann (1860-1932) experimenteller Psychologe
- Paul Kraus (1866-1939) Chemiker
- Robert Thomas Dietrich Luther (1868-1945) Photograph
- Paul Baumann (Unternehmer) (1869-1961) Farbenhändler
- Otto Prase (1874-1956) Malermeister

farbigen Pigmenten ein weißes zusammengesetzt werden. Alle aufgestellten Experimente sind falsch oder falsch angewendet.“

200 Jahre nach der Veröffentlichung von Goethes Werk besitzt sein Beitrag „Zur Farbenlehre“ heute vorwiegend kulturhistorische Bedeutung. Seine Überlegungen zu den *physiologische Farben* und deren Wirkung für den Betrachter wurden aufgegriffen. Seine Beobachtungen und Methoden in Bezug auf die Wirkung der Farben sind als Beginn der modernen Farbpsychologie anzusehen. Farbe beeinflusse das Gefühl und wirke dadurch direkt auf die „Seele“ und somit auch auf die Einheit von Körper und Geist. Goethe unterteilte in schöne Farben, die dem Betrachter sympathisch sind und unsympathische, die dem Auge weh tun.

Eugène Chevreul

Eine Zwischenstellung nehmen Eugène Chevreul, der sich mit dem intensitätssteigernden Simultankontrast der Pigmente in ihrer industriellen und künstlerischen Bedeutung befasste, und Gertrud Grunow ein, die sich mit den entsprechenden motorischen Wirkungen der Farbe befasste.

Physikalische Ansätze

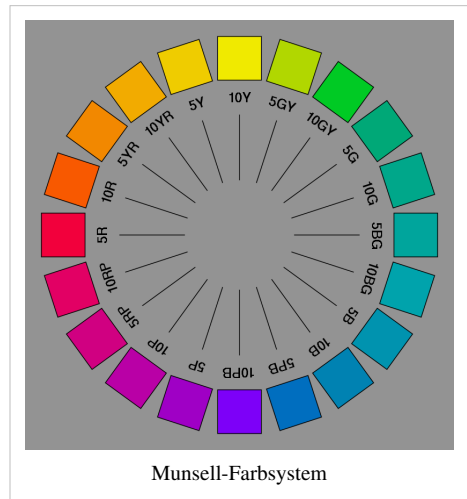
Die physikalischen Ansätze haben ihren Ausgangspunkt in James Clerk Maxwells Nachweis, dass sich jede Farbe aus den *Primär-* oder Grundfarben Rot, Grün und Blau zusammensetzt (1861), letztlich aus 'Farb'lichtern.

Mit dem Einsetzen der Industrialisierung stiegen auch die Anforderungen an eine Normierbarkeit von Farbe. Die Entwicklung der Photographie, die Entdeckung neuer Elemente mittels Spektralanalyse befördert die Fragestellungen nach Ursachen und Zusammenhängen. Ostwalds Farblehre sollte ein Hilfsmittel für den Maler sein, der Ausgang aber war das physikalische Verständnis von Farbe mittels seiner Energieauffassung.

Munsells Color Notation

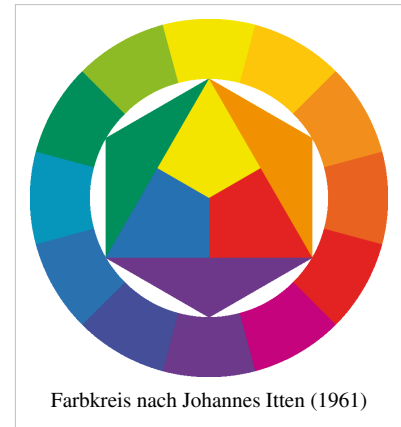
Der amerikanische Maler A.H.Munsell unterzog sich der Mühe, einen Katalog von Farben so zu gestalten, dass zwischen allen Farbnuancen seiner Empfindung nach gleiche Abstände entstanden. „A Color Notation“ von 1905 ist ein Atlas von Farbproben und wurde zu einem weit verbreiteten Farbsystem. Dabei war er zunächst nach N. O. Roods ebenfalls vom damals üblichen Farbkreis ausgegangen.

Zwar wirkt der Kreis als ideale Figur glaubhaft für die Sensitivität der Farben, aber während seiner Entwicklung kam er doch zum Schluss, dass sich der Kreis und dreidimensional die Farbkugel nicht bestätigen ließen. Mit den in den 1900er Jahren zugänglichen Farbmitteln formulierte er so einen Farbraum. Den Farbton («Hue») ordnete er 100 Stufen zu, wobei er von fünf Hauptfarben (yellow-green-blue-purple-red) und fünf Nebenfalten (YG>BG>PB>RP>YR) ausgeht. Für die Ordnung der Farben in der dritten Dimension ergeben zehn *V-Units* («value» = Helligkeitswert): hierfür teilte er zwischen Schwarz (0) und Weiß (100) die unbunten Farben in 10 Stufen von unterschiedlichen Neutralgrau. Der C-Wert, die Chroma (Maß der Sättigung) wurde als offene Skala gebildet. Mit seiner Erfahrung als Maler kam er zur Erkenntnis, dass sich die als Grundlage gewählten verschiedenen Grundfarben, Nebenfalten und Zwischentöne mit unterschiedlichen «chroma»-Stufen ausfärben lassen.



Johannes Itten

Johannes Itten (1888-1969), Zeichenlehrer am Bauhaus, differenzierte durch die Komplementärfarben Orange, Grün und Violett und stellte sie, wie Goethe, in einem Farbkreis dar. Weiß und Schwarz bezeichnete er als „Nicht-Farben“. Sein dreidimensionales Ordnungsmodell der Farben war die Kugel, die Philipp Otto Runge im Jahre 1810 entwickelt hatte. Auf der Grundlage der Idee seines Lehrers Adolf Hölzel stellte er seine Theorie der „Sieben Farbkontraste“ auf, die die gegenseitige Abhängigkeit und Beeinflussung von Farben untereinander darstellt.



Farbkreis nach Johannes Itten (1961)

Harald Küppers

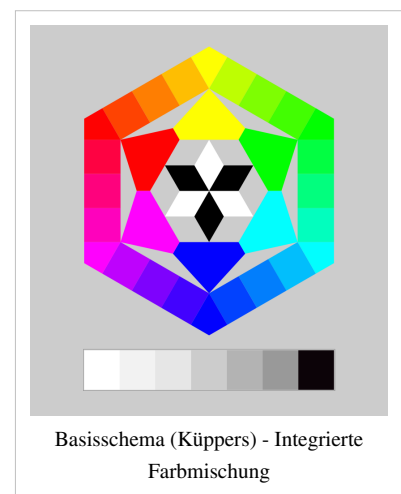


Der Farbkörper der Farbenlehre nach Harald Küppers

Harald Küppers entwickelte ausgehend von seiner Tätigkeit in der Reprotechnik in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts eine Farbenlehre. Er hinterfragte die Ansätze von Goethe und Itten, und bezeichnete das Auge als „Das Grundgesetz der Farbenlehre“. Küppers fand, dass nicht alle acht Grundfarben durch Mischungen deckender Farbmittel herzustellen sind. Er geht von acht Grundfarben aus, sechs bunten und zwei unbunten. Sein dreidimensionales geometrische Ordnungssystem der Farben ist das Rhomboeder. Die „reinen bunten Farben“ ordnet er auf dem Buntarten-Sechseck an. Nach seiner Erkenntnis gibt es nur geradlinige (lineare) Beziehungen zwischen sämtlichen Farbnuancen. Die „unbunten“ Farben auf der Unbuntarten-Gerade des Rhomboeders liegen zwischen Schwarz und Weiß. Seine „Basisempfindung“ des Sehorgans ist Schwarz.

Anschaulich fasste er die Theorie im „Basisschema“ zusammen: Schwarzen Rhomben in der Mitte weisen auf seine drei Urfarben („Empfindungskräfte“ des Sehorgans): Orangerot (R), Grün (G) und Violettblau (B). Bei zwei Empfindungskräften entstehen die anderen drei Farbempfindungen Gelb (Y), Magentarot (M) und Cyanblau (C), wirken alle drei Empfindungskräfte gleichzeitig vollständig führt das zur Farbempfindung Weiß (dafür stehen die weißen Rhomben).

Analog zur Arbeitsweise des Sehorgans funktioniert laut Küppers die „Additive Farbmischung“, als Mischung von bunten „Farblichtern“. Die „Basisfarbe“ Schwarz ist das Fehlen jeglicher Farbpunkte. Die Farblichter „RGB“ sind die „Primärfarben“ (Schwarze Rhomben weisen im Schema darauf). Mischung von je zwei Primärfarben ergibt die „Sekundärfarben“ „YMC“ (gelb, magenta, cyan). Weiß ist als Mischung aller drei Primärfarben eine „Tertiärfarbe“.



Basisschema (Küppers) - Integrierte Farbmischung

Transparente Farbschichten wirken als Farbfilter nach der „subtraktiven Farbmischung“. Die Basisfarbe ist sodann Weiß (etwa die weiße Paperoberfläche). Hierbei sind die Farbschichten „YMC“ die Primärfarben (Weiße Rhomben im Basisschema weisen darauf). Absorptionen in den übereinander liegenden Filterschichten führen zu Sekundärfarben „RGB“. Liegen drei Filterschichten übereinander ist die Tertiärfarbe Schwarz. (Schwarze Rhomben)

Den Begriff „Integrierte Farbmischung“ mit acht Grundfarben entwickelte er für deckende Farbmittel (Temperafarben Gouache, Acrylfarben, Lacke, Farbpulver). Die sechs bunten Grundfarben im Zackenring weisen auf die Ecken des Buntarten-Sechsecks hin, Schwarz und Weiß an den Enden der „Unbunten-Geraden“ sind die übrigen Grundfarben. Die Graustufen (Unbuntarten) als Mischung aus Weiß und Schwarz sind ebenso Sekundärfarben. Tertiärfarben nennt er gebrochene, also „unreine“ Farben, die aus der Mischung dreier Grundfarben entstehen.

Unterscheidung der Farblehren

Lehren und Theorien zum komplexen Gebiet Farbe unterscheiden sich durch ihre Zielstellung und ihre Methoden. Die naturwissenschaftliche Grundlage für die Wahrnehmung von Farben ist, dass Licht im (sichtbaren) elektromagnetischen Spektrum eine Information trägt, die in der menschlichen Empfindung als Farbe erkannt wird.

Alle Farblehren gingen anfangs vom unmittelbaren Sehen aus, um eine Systematik für den Einsatz der ›gesehenen‹ Farben und deren Beziehung untereinander zu schaffen. Diese *künstlerisch-ästhetischen Farblehren*, die im Laufe der Jahrhunderte immer wieder von „akademischen“ Malern beeinflusst wurden, sind in die Kunstwissenschaft eingegangen. Solche Farbtheorien stammen beispielsweise von Leonardo da Vinci, Johann Wolfgang von Goethe, Adolf Hölzel und Georges Seurat.

Stand dabei das subjektive Empfinden und die künstlerische Absicht im Vordergrund, kamen in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhundert physikalische Erkenntnisse und die Anforderungen der wachsenden Industrie als neue Grundelemente hinzu. Stellvertretend sei Munsells Farbsystem genannt. In Deutschland war es vor allem Wilhelm Ostwald, der farbmimetrische Überlegungen anregte, die auf künstlerische Gestaltung Einfluss nehmen sollten.

Biologische Forschungen brachten Fortschritte bei der Sehphysiologie und den chemischen und physiologischen Aspekten der Farbwahrnehmung. Farblehren, die die gegenseitige Beziehung von Farbe und Seele bewerten, basieren auf der Farbenpsychologie. Solcher Art ist die Farblehre des Malers und Bauhausmeisters Johannes Itten, der mit seinen Beobachtungen die Anregung zur heute populären Farbtypenlehre gab.

In naturwissenschaftlicher Betrachtung gründet die Farbmimetrik, die sich mit der Messung von Farben und besonders der Erfassung von Farbabständen beschäftigt. Notwendige Differenzierung dieses Fachgebietes ist die Einteilung in die *niedere* Farbmimetrik, die die physikalischen Ursachen von Farbe und ihre Eigenschaften beschreibt. Die *höhere* Farbmimetrik bezieht die Wahrnehmung von Farbe ein. Ziel der Farbmimetrik ist, einen geeigneten Farbraum zu definieren, in dem sich Farben gleichabständig anordnen lassen, da das Auge in verschiedenen Farbbereichen den physikalischen Reiz weder linear noch gleichmäßig unterscheidet. Empfindungsgleiche Farbabstände - oder vielmehr die Beziehung $\Delta E = f(X,Y,Z)$ - zu verdeutlichen gelingt mittels der MacAdam-Ellipsen. Die fortschreitende Rechentechnik und die mathematische Theorie führten zu mehreren Anpassungen bei den standardisierten Farbräumen.

Die Farbmimetrik stellt Bezug zu Spektralfarben, der additiven, der subtraktiven Farbmischung und den Gesetzen der Lichttechnik her. Sie bildet die Grundlage für Farblehren, die naturwissenschaftlich ausgerichtet sind. Eine solche Farblehre ist die von Harald Küppers, die aus der Absicht entstand naturwissenschaftliche Fortschritte aufzunehmen, um insbesondere didaktische Hilfen zu schaffen, die dem Techniker ein künstlerisches Verständnis ermöglichen.

Naturwissenschaftliche Herangehensweisen, psychologische und künstlerisch-ästhetische stehen nebeneinander, gegeneinander oder werden miteinander verknüpft, je nach Standpunkt und Arbeitsgebiet. Eine rein physikalische Sichtweise von Farbe steht einer ausschließlich ästhetischen gegenüber. Für technische Anforderungen ist die alphanumerische Erfassung von Farbe unabdingbar, dagegen kann *„die gefällige Form“ nach den „Gesetzen des*

Schönen^[3] oder ein anderes künstlerisches Postulat nicht auf einer vorrangig numerischen Ebene erfasst werden.

Literatur

- Harald Küppers: *Schnellkurs Farbenlehre*. DuMont, Köln 2005, ISBN 3-8321-7640-3
- Harald Küppers: *Das Grundgesetz der Farbenlehre*. DuMont, Köln 1978, 10. Auflage 2002, ISBN 3-8321-1057-7, Taschenbuch. Kompendium und didaktische Konzeption für den Unterricht
- Harald Küppers: *Farbe verstehen und beherrschen*. Praktische Farbenlehre. DuMont Literatur und Kunst Verlag, Köln 2004, ISBN 3-8321-7434-6
- Albert Henry Munsell: *A Color Notation*. Boston 1905.
- Albert Henry Munsell: *The Atlas of the Munsell Color System*. Boston 1915.
- Johannes Pawlik: *Theorie der Farbe*. DuMont, Köln 1990, ISBN 3-7701-0510-9
- Johannes Pawlik: *Praxis der Farbe. Bildnerische Gestaltung*. DuMont, Köln 1981, ISBN 3-7701-1238-5
- Klausbernd Vollmar: *Sprache und Macht der Farben*. ars momentum, Witten 2007, ISBN 978-3-938193-34-1.
Kompakteinführung unter physikalischen, künstlerischen und psychologischen Gesichtspunkten + Basisliteraturübersicht
- Moritz Zwimpfer: *Farbe.Licht.Sehen.Empfinden. – Eine elementare Farbenlehre in Bildern*. Paul Haupt, Bern/Stuttgart 1985, S. 168, ISBN 3-258-03504-0

Weblinks

- animierte Programme zur Farbmischung und Farbwahrnehmung^[8]
- Küppers' Farbenlehre^[10]
- Farbsysteme, historische Farblehren^[7]
- Goethes Farblehre^[4]
- color.org^[5] Hauptseite der CIE (Color Division)
- Goethes Farbenlehre im Volltext^[6]

Einzelnachweise

- [1] Farbkörper (<http://web.archive.org/web/20080517190049/http://www.hta-bu.bfh.ch/a/bg/skript/elord/e35histmodell.htm>)
- [2] Küppers Farbkörper (<http://lehrerfortbildung-bw.de/kompetenzen/gestaltung/farbe/systeme/kueppers/>) auf Lehrerfortbildung-BW.de
- [3] Hermann Wilhelm Vogel: *Handbuch der Photographie*. Teil IV. Berlin 1894, Photographische Kunstlehre oder die künstlerischen Grundsätze der Lichtbildnerei.
- [4] <http://www.farbimpulse.de/farbsysteme/detail/0/11.html>
- [5] <http://www.color.org/index.xalter>
- [6] <http://www.farben-welten.de>

Farbfernsehen

Als **Farbfernsehen** bezeichnet man eine Art des Fernsehens, bei der (im Unterschied zum Schwarz-Weiß-Fernsehen) nicht nur die Helligkeitswerte aufgenommen und wiedergegeben werden, sondern auch die Farben.

Geschichte

Seit dem 18. Jahrhundert weiß man, dass sich wegen der Metamerie Licht von (fast) beliebigem Farbton synthetisieren lässt, indem man das Licht der Primärfarben - im Fall des menschlichen Auges sind dies Rot, Grün und Blau - je nach Bedarf gewichtet überlagert. ^[1]

Fast gleichzeitig mit der Entwicklung des Fernsehens überhaupt experimentierte man auch mit dem Farbfernsehen. Bei den ersten Versuchen wurde entweder mit drei Kanälen gearbeitet, wo jeweils ein Bild in einer der drei Grundfarben übertragen wurde, oder der Übertragung mittels eines Kanals und schnell rotierender Farbfilter vor der Kamera und dem Empfänger. Hierbei musste allerdings eine wesentlich höhere Anzahl von Einzelbildern übertragen werden, damit der Eindruck eines flimmerfreien Bildes entsteht. Der amerikanische Fernsehsender CBS stellte 1943 ein Farbfernsehsystem mit schnell rotierendem Farbfilter vor. Übertragen wurden Fernsehbilder mit nur 405 Zeilen und 144 Bildern pro Sekunde. Das Bild war zwar sehr gut, jedoch waren die Empfänger durch die sehr viel größere Farbfilterscheibe vor dem kleinen Bildschirm sehr klobig, laut und nicht kompatibel mit dem inzwischen eingeführten Schwarz-Weiß-System mit 525 Zeilen und 60 Halbbildern pro Sekunde. Im Oktober 1953 wurde schließlich in den USA die Ära regelmäßiger Farbübertragungen - jetzt mit einem kompatiblen System - eingeleitet.

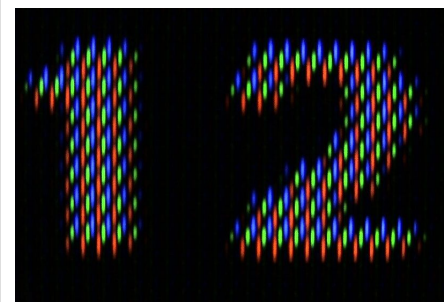
Einführung in Deutschland

Der Start des Farbfernsehens in der Bundesrepublik Deutschland erfolgte auf der 25. Großen Deutschen Funk-Ausstellung in West-Berlin am 25. August 1967 um 10:57 Uhr mit der Betätigung eines großen roten Tasters (der eine Attrappe war) durch Vizekanzler Willy Brandt. Dabei geschah ein kleines Missgeschick: Kurz bevor Brandt den Knopf drückte, schalteten die Techniker bereits das Farbsignal auf Sendung – man begründete es anschließend mit einem sehr empfindlichen Taster.

Um 9:30 Uhr übertrugen die Fernsehsender ARD und ZDF die Begrüßungsmoderation durch Edith Grobleben vom Sender Freies



Start des Farbfernsehens



Darstellung einer weißen "12" auf schwarzem Hintergrund auf einem Fernseher. In der Nahaufnahme erkennt man die einzelnen Farben, aus denen die Zahlen zusammengesetzt sind.



"Elektronenkanone", ausgebaut aus einem Farbfernseher. links: Seitenansicht; Deutlich zu erkennen die Vakuumdurchführung, rechts: Frontansicht; Man sieht deutlich die Austrittslöcher der drei Elektronenstrahlen, die die drei Farben ansteuern

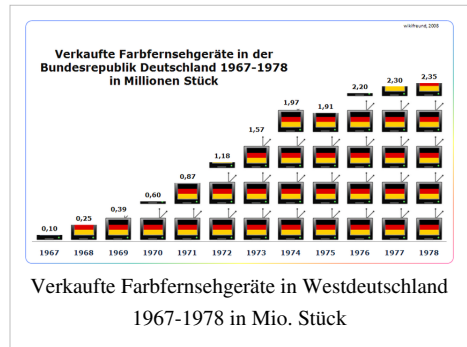
Berlin (SFB) noch in schwarz/weiß, die Verabschiedung dann in Farbe. Ab 14:30 Uhr zeigten ARD und ZDF gemeinsam als Testsendung den französischen Spielfilm "Cartouche der Bandit" mit den Hauptdarstellern Jean-Paul Belmondo und Claudia Cardinale. Am gleichen Abend zeigte das ZDF seine erste farbige Fernsehshow mit der 25. Ausgabe von "Der goldene Schuss" mit Vico Torriani; die ARD folgte einen Tag später um 16:30 Uhr mit einem Bericht von Gerd Ruge über die Expo 67 in Montréal und am Abend dem "Galaabend der Schallplatte", präsentiert von Dietmar Schönherr. Die ersten Farbfernsehempfänger kamen in der Bundesrepublik zu Preisen von über 2200 DM auf den Markt, was unter Berücksichtigung der Inflation einer heutigen Kaufkraft von etwa 3797 Euro entspricht. Einen starken Kaufanreiz für Farbgeräte brachten die Olympischen Sommerspiele 1972 in München sowie die Fußball-Weltmeisterschaft 1974 in Westdeutschland. Die Geräte blieben bis Ende der 1970er Jahre im heutigen Vergleich teuer - 1975 kostete ein Gerät mit 66-cm-Bildschirm um die 2000 DM (das entspricht heute 2490 Euro).

Mit dem Start des 2. DFF-Programms am 3. Oktober 1969 wurde das Farbfernsehen auch in der DDR eingeführt. Am selben Tag wurde auch der Berliner Fernsehturm eingeweiht. Zur Farbübertragung wurde jedoch anders als in Westdeutschland das SECAM-System verwendet. Gegenseitiger Empfang (Kompatibilität) in schwarzweiß blieb jedoch möglich. Um in der Bundesrepublik Deutschland das DDR-Programm auch farbig sehen zu können, wurden bald

von der Industrie PAL/SECAM-Decoder („DDR-Farbe“) zu Preisen von bis zu 300,- DM (incl. Einbau) angeboten.

Sonstiges

- In der Anfangszeit wurden den wenigen (der erhöhten Kosten wegen) Farbproduktionen im alltäglichen Schwarz/Weiß seitens der Fernsehanstalten zum Hinweis und als Kaufanreiz kurze Teaser von ca. zehn Sekunden Dauer vorangestellt. Im Ersten öffnete sich – von einer Fanfare akustisch untermalt – blumig eine Farbrosettengrafik mit dem zentralen Schriftzug: „in Farbe“; im ZDF wurden stattdessen sich drehende Glaswürfel gezeigt, in denen sich – wie in einem Prisma – das Licht (schwach) farbig brach.
- Die Tagesschau der ARD wurde erst ab 1970 in Farbe ausgestrahlt. Übertragungen aus dem Plenarsaal des Bundestages in Bonn erfolgten sogar noch bis Ende der 1970er Jahre in Schwarz/Weiß.
- Heinz Reincke spielte die Hauptrolle in der ersten Fernsehserie, die in Deutschland in Farbe ausgestrahlt wurde: „Adrian der Tulpendieb“ (gedreht bereits 1966), die schon während des Versuchsprogramms ausgestrahlt wurde.



Einführung in Österreich

Der Österreichische Rundfunk sendete erstmals am 1. Januar 1969 in Farbe. Die erste Sendung, welche in Farbe ausgestrahlt wurde, war das Neujahrskonzert der Wiener Philharmoniker.

Andere Länder

Großbritannien

Das zweite Programm der BBC, das von Anfang an in 625 Zeilen sendete, startet am 1. Juli 1967 mit Farbsendungen nach dem PAL-System. Mit der Umstellung der Zeilenzahl (Auflösung) von 405 auf die heute üblichen 625 Zeilen folgte das erste Programm am 20. November 1969. Noch bis 1985 wurde das erste Programm daneben in Schwarz-Weiß mit 405 Zeilen übertragen, um die Besitzer alter Fernsehgeräte zu versorgen. Im Jahr 1985 waren die Empfänger schließlich so günstig geworden, dass es wirtschaftlicher war, die noch betriebenen 405-Zeilen-Geräte auf Staatskosten gegen neue Geräte einzutauschen, als die 405-Zeilen-Übertragung fortzusetzen.

Rumänien

Dort gibt es ab 1968 ein zweites Fernsehprogramm in schwarz-weiß. Erst 1983 begann die Übertragung in Farbe.

Farbübertragung

Bedingung bei der Entwicklung der Farbübertragungssysteme beim analogen Fernsehen war zum einen eine Kompatibilität zu bestehenden Schwarz-Weiß-Fernsehapparaten, zum anderen eine Abwärtskompatibilität der neuen Farbfernsehgeräte für herkömmliche

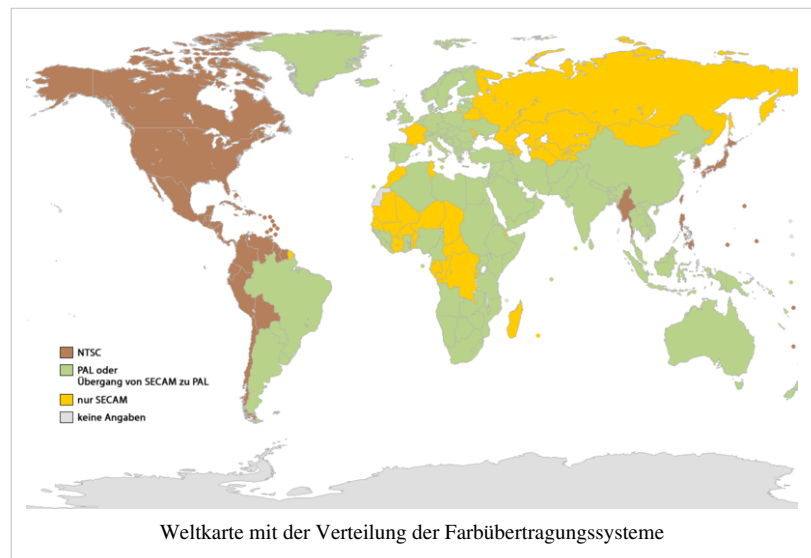
Schwarz-Weiß-Ausstrahlungen. Dabei mussten Kompromisse in Kauf genommen werden und typische Schwächen des menschlichen Auges wurden ausgenutzt.

Das Frequenzspektrum beim herkömmlichen Schwarz-Weiß-Fernsehen ist rund 5 MHz breit (siehe Fernsehsignale). Gemäß den Gesetzen der Fourier-Analyse werden dabei in den tieferen Frequenzen die Grundstrukturen des Bildes übertragen, höhere Frequenzen treten in feinen Details auf oder an scharfen Kanten. Falls es sich bei den Bildinhalten um gewöhnliche Aufnahmen aus der realen Welt handelt, so sind die räumlichen Helligkeitsverläufe eher weich und kaum sprunghaft. Aus diesem Grund treten höhere Frequenzen im Allgemeinen wesentlich seltener auf. Eine Beeinträchtigung dieser höheren Frequenzen äußert sich daher kaum, und wenn, dann nur in einem leicht unschärferen Bild.

Betrachtet man die spektrale Verteilung des Helligkeitssignals genauer, so treten Frequenzen im Abstand der halben Vertikalfrequenz mit Maxima jeweils im Abstand der Zeilenfrequenz auf.

Aufgrund dieser beiden Tatsachen schachtelt man das Farbsignal passgenau im oberen Bereich des normalen Fernsehsignals ein.

Anfänglich benutzte man zur Trennung von Farb- und Helligkeitssignal im Empfänger einen einfachen Hoch- bzw. Tiefpass, mittlerweile stehen für hochwertige Empfangsgeräte spezielle Kammfilter zur Verfügung, womit die



Bandbreite des Helligkeitssignals nicht mehr wie vorher abgeschnitten werden muss.

Dies reduziert die sog. Cross-Color- und Cross-Luminance-Effekte, die durch ein Übersprechen des Chrominanz- [Farb-] auf das Luminanz- [Helligkeits-] Signal zustande kommen und sich in Änderungen der Bilder widerspiegeln.

Zur eigentlichen Übertragung des Farbsignals benutzt man weitere technische Kunstgriffe. Es wäre viel zu aufwändig und auch nicht nötig, neben dem bereits vorhandenen Helligkeitssignal Y noch die Signale für die drei Grundfarben Rot, Grün, Blau der additiven Farbmischung zu übertragen. Man bildet über eine Matrix die Differenzsignale U (Blau minus Helligkeit) und V (Rot minus Helligkeit; siehe auch YUV-Farbmodell). Diese erfahren weiterhin eine Absenkung, um Übermodulation zu vermeiden, werden dann übertragen und können im Empfänger zusammen mit dem Helligkeitssignal wieder zu den Farbsignalen für Rot, Grün und Blau rekonstruiert werden.

Rechenbeispiel:

```
(Rot minus Helligkeit) plus Helligkeit = Rot
(Blau minus Helligkeit) plus Helligkeit = Blau
Helligkeit minus Blau minus Rot       = Grün
```

NTSC

Bei der Einführung des Farbfernsehens war eine Bedingung, dass die neue (Farb-)Fernsehnorm kompatibel zur Norm des alten Schwarz-Weiß-Fernsehens sein musste – die in der Bevölkerung vielfach schon vorhandenen Schwarz-Weiß-Geräte sollten also auch die neuen Farbsendungen anzeigen können, wenn auch natürlich nicht farbig. Dies wurde zunächst 1954 in den USA durch das NTSC-Verfahren gelöst, ein ingenieurtechnischer Geniestreich mit nur einem kleinen Schönheitsfehler: Bei einem NTSC-Empfänger muss der Farbton von Hand eingestellt werden. Der Betrachter orientiert sich dabei an der Natürlichkeit der menschlichen Haut- und Gesichtsfarbe. Infolge von Störungen auf dem Übertragungsweg musste diese Einstellung aber von Hand oft mehrmals während einer Sendung vorgenommen werden. Der Ärger darüber führte zu umgangssprachlichen Bezeichnungen wie „Slimming machines“ (Abmagerungsmaschinen) für das Fernsehgerät oder die Interpretation der Abkürzung als „Never The Same Color“ (Niemals dieselbe Farbe). Erst mit der Einführung der Ultraschall-Fernbedienung im Jahr 1957 wurde die Farbtonkorrektur bequemer.

PAL

Die Verfahren PAL und SECAM, die in Europa gebräuchlich sind, wurden erst Mitte der 1960er Jahre eingeführt (zehn Jahre später als in den USA bereits das dort verwandte NTSC-Farbfernseh-System etabliert war), besitzen aber bei der damals einzig existierenden terrestrischen analogen Übertragung deutlich bessere Qualität bei der Farbtondarstellung. Sie kommen ohne manuellen Farbtonabgleich aus. PAL zum Beispiel, entwickelt durch den Ingenieur und Fernsehpionier Walter Bruch, kompensiert Störungen, indem es zu einer Farbtonabweichung deren negative Kopie addiert. Dazu wird bei der Übertragung der Farbinformation vom Sender jeweils eine Farbinformation pro Zeile um 180 Grad gedreht. Mit diesem Trick werden Farbfehler kompensiert. Entsprechend auch der Name des deutschen Farbfernseh-System: PAL = übersetzt: Phase alternating line; was zu deutsch heißt: Wechseln der Phasenlage. Analog zur Neuinterpretation von NTSC gibt es auch für die Abkürzung PAL eine scherzhafte Erklärung: "Pay Additional Luxury" (Bezahle für zusätzlichen Luxus).

SECAM

Nicht zuletzt aus politischen Gründen wurde in Frankreich das SECAM-Verfahren entwickelt, das auch im gesamten Ostblock sowie anfangs auch im französischsprachigen Teil Belgiens, sowie in Griechenland verwendet wurde. Es hat eine ähnliche Fehlerkorrektur wie das PAL-System - allerdings auch einige übertragungstechnische Nachteile.

Digitales Fernsehen

Bei digitalen Videosignalen wird das RGB-Signal zwar üblicherweise weiterhin in ein Helligkeitssignal und zwei Farbdifferenzsignale zerlegt, letztere werden jedoch nicht mehr mit ersterem vermischt, sondern getrennt übertragen (im YCbCr-Format ggf. mit Farbunterabtastung. Es gibt daher im digitalen Bereich keine Entsprechungen zu PAL, SECAM und NTSC. Die Bezeichnung *PAL* wird jedoch oftmals für 576i50-Signal und die Bezeichnung *NTSC* für 480i60-Signal benutzt, jedoch ohne Bezug zu den analogen Farbkodierungen.

Weblinks

- Vom Kupferstich zu PALPlus – Geschichte und Grundprinzipien des Farbfernsehens ^[2]
- Warten auf die bunte Scheibe, *Die Zeit* vom 11. März 1966 ^[3]
- PAL-Farbfernseher von Telefunken (1967) ^[4]
- NTSC-Farbfernseher von RCA (1956) ^[5]
- Ed Reitan's Color Television History (engl.) ^[6]
- The Color Television Revolution (engl.) ^[7]

Literatur

- Liebscher u.a., Rundfunk-, Fernseh-, Tonspeichertechnik, VEB Verlag Technik Berlin, 1981 (antiquarisch)

Anmerkungen

- [1] Rot, Grün und Blau sind für das menschliche Auge die Primärfarben der additiven Farbmischung. Die Primärfarben entsprechen ausgewählten Spektrallinien innerhalb des Farbspektrums, das entsteht, wenn weißes Sonnenlicht durch ein Prisma in die Spektralfarben aufgefächert wird. Es genügt, die drei Spektrallinien, die Rot, Grün und Blau darstellen, mit entsprechender Gewichtung zu überlagern, um - gemäß dem Prinzip der additiven Farbmischung - im menschlichen Auge den Farbeindruck von weißem Licht oder einer beliebigen anderen Lichtfarbe zu erzeugen.
- [2] <http://www.ahok.de/dt/palplus.html>
- [3] <http://www.zeit.de/1966/11/Warten-auf-die-bunte-Scheibe>
- [4] <http://bs.cyty.com/menschen/e-etzold/archiv/TV/telefunken/palcolor708.htm>
- [5] <http://bs.cyty.com/menschen/e-etzold/archiv/TV/rca/ctc5e.htm>
- [6] <http://www.novia.net/~ereitan/>
- [7] <http://www.ev1.pair.com/colorTV/colortv-revolution.html>
-

Farbfilm

Aufbau eines Farbnegativfilms

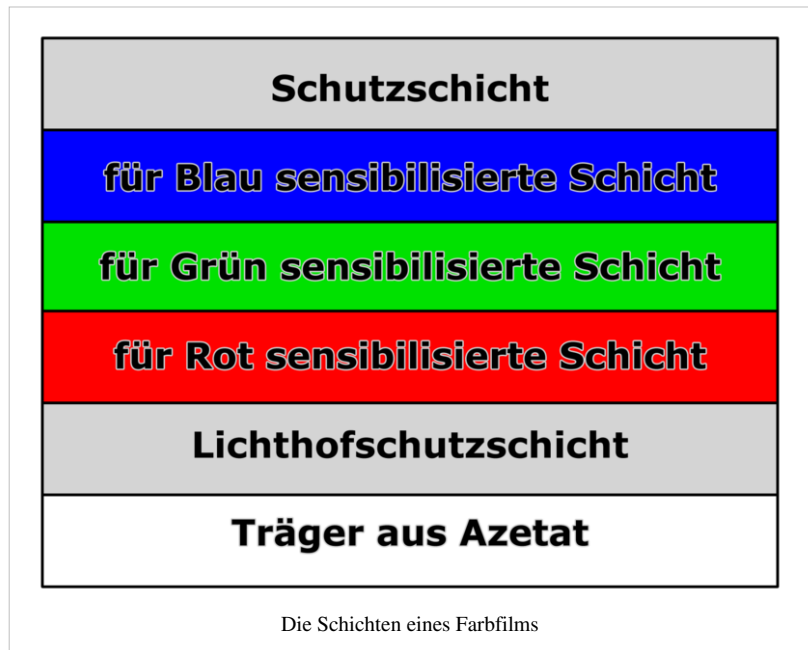
Dargestellt ist der schematische Aufbau eines Farbnegativfilms (Dreischichtfarbfilm). Schematisch deshalb, da es je nach Hersteller und Film zu zusätzlichen Schichten kommen kann, was in aller Regel bei den handelsüblichen Markenfabrikaten heute auch der Fall ist. Bei der überwiegenden Zahl aller heute hergestellten Filme gibt es für jede Farbe (Blau, Grün, Rot) je eine Schicht mit hoher, niedriger und meist auch mittlerer Lichtempfindlichkeit. Zwischen blauempfindlicher Schicht und der grünempfindlichen Schicht befindet sich außerdem grundsätzlich eine Gelbfilterschicht, die blaues Licht

zurückhalten soll. Das ist deshalb nötig, weil die grün- und rotempfindlich gemachten Schichten nicht nur für Grün und Rot, sondern wie alle photographischen Schichten auch für blaues Licht empfindlich sind. Oftmals liegt vor der rotempfindlichen Schicht sogar noch eine leichte Rotfilterschicht, um eine exaktere Rotsensibilisierung zu erreichen und damit eine reinere Blau- und Grünwiedergabe zu bewirken.

Die Schichten entsprechen dabei in fertigem entwickeltem Zustand nicht ihrer Farbe, für die sie empfindlich gemacht sind, sondern ihrer Komplementärfarbe. Die blauempfindliche Schicht bildet also den gelben Farbstoff aus, ist also nicht blau, wie das obige Schaubild es vermuten ließe, die grünempfindliche den purpurnen Farbstoff und die rotempfindliche den Blaugrünen.

Die Firma Fujifilm hat ihren Filmen eine weitere Schicht beigegeben, sie soll vor dem Farbstich von Leuchstoffröhren schützen.

Farbnegativfilme enthalten ferner im Normalfall eine gelbrote bis bräunliche Farbmaske, die die Farbtreue verschlechternde Nebendichten der Farbstoffe ausgleichen soll. Nebendichten entstehen deshalb, weil es keine ideale Empfindlichmachung für bestimmte Farbanteile (Blau, Grün, Rot) und ideale Farbstoffe (Gelb, Purpur, Blaugrün) gibt, diese wären aber für eine vollkommen richtige Farbwiedergabe nötig. Bei Farbumkehrfilmen fehlt diese Maske, da sie durch ihre Farbigkeit bei der Projektion stören würde.



Geschichte des Farbfilms in der Filmproduktion

Filmcolorierung und Kinemacolor-Verfahren

Die ersten farbigen Filme wurden einzelbildweise mit bis zu sechs Farben handkoloriert und sind bereits seit dem Jahr 1896 bekannt. Im Jahr 1905 führte Pathé Frères das Schablonenverfahren ein, um die Kolorier-Arbeit zu erleichtern, eine Methode in dem jeder Film der Reihe nach Farbe für Farbe die Schabloniermaschine durchlief. Am 26. Februar 1909 wurde von Charles Urban der erste mit der Kinemacolor-Technik angewandte Kinofilm im Palace-Theatre in England uraufgeführt. Dieses Zweifarbenverfahren ist 1906 von George Albert Smith erfunden

worden. Dabei werden die Bilder abwechselnd durch zwei verschiedene Farbfilter aufgenommen und anschließend projiziert.

Das Dreifarbenverfahren

Im Jahr 1912 wurde von Léon Gaumont das erste brauchbare Dreifarbenverfahren entwickelt. Mit seiner Kamera nahm er seine Filme unter Verwendung von drei Objektiven mit jeweils einer Grundfarbe auf. Allerdings setzten sich seine Filme, trotz der erfolgreichen Präsentation vor der französischen Fotografischen Gesellschaft und der 1913 in New York gezeigten vertonten Filme, kommerziell nicht durch. Das Verfahren verschwand um 1920, obwohl es zuvor immer wieder neue Filmvorführungen gab.

Im Jahr 1915 wurde von den amerikanischen Physikern Herbert Thomas Kalmus (1881–1963), D. F. Comstock und W. B. Westcott die Technicolor Motion Picture Corporation gegründet, woraus 1922 die Technicolor Incorporated hervorging. Bei diesem sogenannten Technicolor-Verfahren wurden die Farben direkt auf dem Film aufgenommen, womit die Filme auch mit normalen Projektoren wiedergegeben werden konnten. Allerdings waren auch hier zunächst nur zwei Farben verwendet worden. Der erste Film, der diese Technik nutzte, war *The Gulf Between*.

Der erste abendfüllende Kinofilm, der mit dem Technicolor-Verfahren alle drei Grundfarben nutzte, war *Becky Sharp* von Rouben Marmoulian aus dem Jahr 1935. Der Durchbruch für den Farbfilm kam aber erst 1937 mit Disneys Zeichentrickfilm *Schneewittchen und die sieben Zwerge*. Daraufhin folgten auch erfolgreiche Filme wie *Robin Hood, König der Vagabunden* (1938, mit Errol Flynn), *Der Zauberer von Oz* (1939, mit Judy Garland) und der als bester Film 1939 Oscar-prämierte Film *Vom Winde Verweht* (1939, mit Clark Gable und Vivien Leigh).

Die Ufa brachte als ersten Farbfilm einen Tierfilm mit dem Titel *Bunte Tierwelt* 1931 in die Kinos und benutzte das Zweifarbenverfahren Ufacolor. Die Gasparcolor Jürgen Clausens war die erste Produktionsgesellschaft, die nach Gáspárs Dreifarbenverfahren Farbfilme herstellte, zumeist Werbefilme, aber auch 1933 den Zeichentrickfilm *Eine Nacht auf dem kahlen Berge* von Alexandre Alexeieff. 1936 entstand ein kurzer Spielfilm mit dem Titel *Das Schönheitsfleckchen*, bei dem ein von den Firmen Siemens und Perutz entwickeltes Linsenrasterverfahren namens Opticolor verwendet wurde.

Das Verfahren, das sich bei der Ufa schließlich durchsetzte, war das von Gustav Wilmanns und Wilhelm Schneider entwickelte Agfacolor-Verfahren. Agfacolor war ein Drei-Farben-Verfahren, das nur ein einziges Negativ erforderte und damit einfacher funktionierte als das amerikanische Technicolor-Verfahren. Allerdings waren die Farben schwächer und unterlagen größeren Schwankungen. Die ersten Filme, die in Agfacolor produziert wurden, waren die Kulturfilme „Bunte Kriechtierwelt“ und „Thüringen“ (beide 1940). Bis Kriegsende folgten neun Spielfilme: „Frauen sind doch bessere Diplomaten“ (1941), „Die goldene Stadt“ (1942), „Das Bad auf der Tenne“ (1943), „Imensee“ (1943), „Münchhausen“ (1943), „Die Frau meiner Träume“ (1944), „Große Freiheit Nr. 7“ (1944), „Opfergang“ (1944) und „Kolberg“ (1945).

Deutschen Filmamateuren standen seit 1936/37 die farbigen Umkehrfilme von Agfa und Kodak im 16 mm- (später auch 8 mm-) Format zur Verfügung. Dabei wurde der farblich überlegene Kodachromefilm bevorzugt. Adolf Hitlers filmbegeisterte Geliebte und spätere Ehefrau Eva Braun, eine ausgebildete und später bei Hitlers Leibfotograf Heinrich Hoffmann angestellte Fotolaborantin, verwendete ebenfalls bereits um 1938 den Kodachrome-Schmalfilm. Die wesentliche Verbreitung von Farbfilmmaterial begann jedoch erst in der Nachkriegszeit. Der erste westdeutsche farbige Nachkriegs-Kinofilm war *Schwarzwaldmädel*, sein DDR-Gegenstück *Das kalte Herz*.

Siehe auch

- Farbfotografie,
- Tageslichtfilm, Kunstlichtfilm.
- Spektrozonalfilm, Spezialfilm mit zusätzlich einer Emulsion für IR.

Literatur

- Werner Schultze: *Farbenphotographie und Farbfilm. Wissenschaftliche Grundlagen und technische Gestaltung*. Berlin: Springer, 1953
- Gerd Koshof: "COLOR - Die Farben des Films" Berlin: Wissenschaftsverlag Volker Spiess, 1988
- Joachim Polzer (Hrsg.): *Weltwunder der Kinematographie* (5. Ausgabe 1999). (zu Agfacolor), Polzer Media Group, Potsdam 1999. ISBN 3-934535-01-1
- Joachim Polzer (Hrsg.): *Weltwunder der Kinematographie* (6. Ausgabe 2002). (zu Eastmancolor und Technicolor), Polzer Media Group, Potsdam 2002. ISBN 3-934535-20-8
- Joachim Polzer (Hrsg.): *Weltwunder der Kinematographie* (8. Ausgabe 2006). (Zur Geschichte des Filmkopierwerks, 90 Jahre Technicolor), Polzer Media Group, Potsdam 2006. ISBN 3-934535-26-7

Weblinks

- Geschichte des Kinos ^[1]

Referenzen

[1] <http://www.kino-schuessler.at/technik.html>

Farbkreis

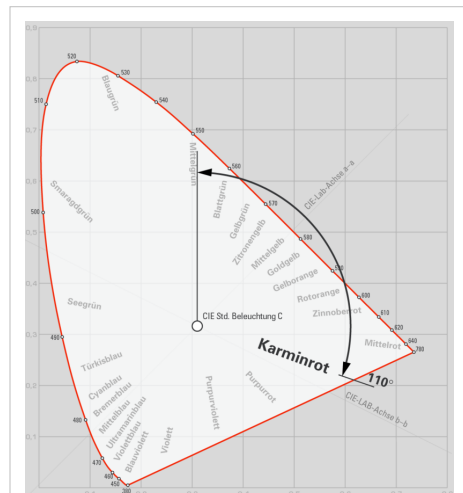
Der **Farbkreis** oder **Bunttonkreis** ist eine Darstellungsform von Farbbeziehungen.

Modellbildung

Die Auswahl und Anordnung der verschiedenen Farbtöne in einem Farbkreis hängt davon ab, welche Eigenschaften visualisiert werden sollen. Farbkreise können unter physikalischen, technischen, psychologischen, ästhetischen, künstlerischen und anderen Aspekten erstellt werden. Es ist jedoch nicht möglich alle diese verschiedenen Gesichtspunkte in einem Farbkreis zu vereinen.

Grundlagen

Lässt man normalsichtige Versuchspersonen Farbmuster nach der Empfindung auf Ähnlichkeit sortieren, werden die Farbtöne in der Regel in dieselbe Reihenfolge gebracht. Anfang und Ende der Reihe sind sich dabei so ähnlich, dass die Reihe zu einem Kreis geschlossen werden kann. Dies geschieht auch ohne Kenntnis der physikalischen bzw. neurologischen Zusammenhänge der Farbwahrnehmung.



Farbtonkreis von Müller, eingebaut in die bekannte Hufeisengrafik der CIE, unter Verwendung der CIE-Standardbeleuchtung C.

Die Anordnung der Farbtöne kann auch nach Gesichtspunkten der Farbmeterik gewählt werden. Geometrische Aspekte des Kreises wie oben, unten oder gegenüberliegend werden genutzt, um Zusammenhänge der Farbwahrnehmung darzulegen. Ein Gesichtspunkt sind Farbkontraste. Ein anderer ist es, die dem Empfinden gemäßen Abstände zwischen den Farben über den ganzen Linienzug des Kreises hinweg ausgewogen zu halten.

Je nachdem, welche Eigenschaften und Zusammenhänge vom beabsichtigten Anwendungsbereich als primär angesehen werden, gibt es verschiedene Möglichkeiten einen Farbkreis, ein Farbpolygon oder einen Farbstern zu bilden. Diese Wahlmöglichkeit bot in der Geschichte der Farbtheorie (und gibt bis heute) Anlass zu teils erbitterten Kontroversen über den einzig richtigen Farbkreis. Dabei ist zu beachten, dass der Farbkreis immer nur ein Modell der Wirklichkeit sein kann, er bleibt nur eine Möglichkeit unter mehreren, die komplexen Beziehungen und Zusammenhänge von Farben zu veranschaulichen und dadurch verständlich zu machen.

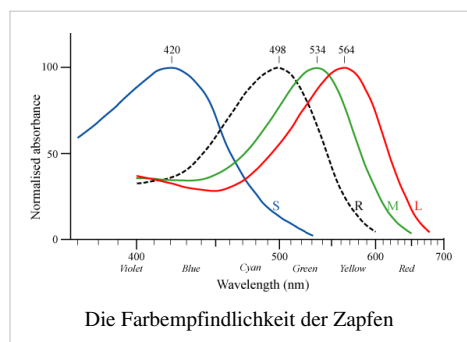
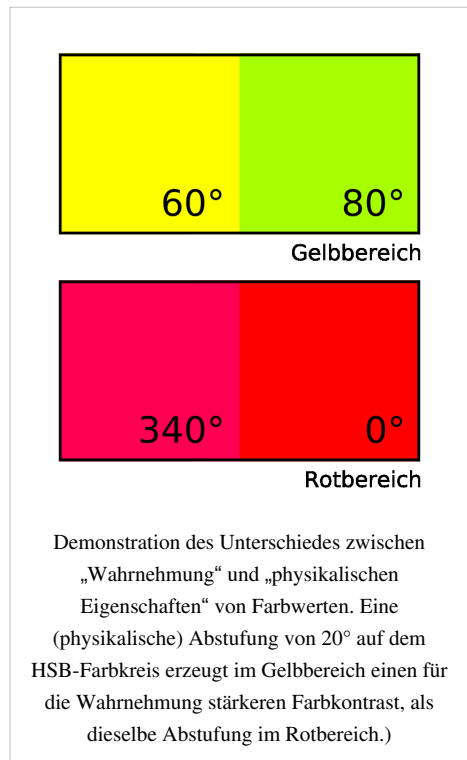
Die Farbgestaltung in der Kunst und im Design orientiert sich vorwiegend am menschlichen Farbempfinden. Der menschliche Gesichtssinn, bestehend aus Augen und Gehirn, ist ein kompliziertes Organsystem, das die kontinuierliche Änderung der Wellenlänge von sichtbarem Licht als Kombination von drei Grundfarben auf diskontinuierliche Weise interpretiert. Die physikalische Ursache der Farben lässt sich nicht linear in Beziehung zur Wahrnehmung setzen. An den physikalischen Eigenschaften des Lichtes orientierte Farbsysteme stellen Projektionen dar, die für ästhetische Gestaltung nur von begrenztem Wert sind.

Die Formulierung „subjektive Wahrnehmung“ ist hier nicht im Sinne von Geschmackssache zu verstehen. Die Ordnung des harmonisierten Farbkreises basiert auf objektiv nachweisbaren Eigenschaften des Gesichtssinnes und soll intersubjektiv – das heißt von jedem normalsichtigen Betrachter – nachvollziehbar sein. Tests haben ergeben, dass die weitaus meisten Menschen Farben beinahe gleich wahrnehmen. Weder die Anzahl unterscheidbarer Farben noch die Empfindung von Ähnlichkeiten variieren wesentlich. Das muss auch so sein, denn sonst könnten wir nicht effizient über Farbe kommunizieren, Farbbezeichnungen wären bedeutungslos.

Kreis als Idealfigur

Im Farbkreis wird die Farbenvielfalt unter Vereinfachungen auf eine Fläche abgebildet. Der Kreis oder Ring birgt als 2-dimensionales Farbsystem die gleichen Probleme wie die Darstellung eines Farbkörpers und die Eingrenzungen durch den Gamut einer farb(wieder)gebenden Methode.

„Eine Farbvalenz wird ja [...] durch drei Farbwerte bestimmt, die ihrem Wesen nach Integralwerte sind. Zwei Farbvalenzen sind gleich, wenn die einander entsprechenden Integrale gleich sind. Dazu ist es aber nicht erforderlich, daß auch die Farbreizfunktionen einander gleich sind. Sind beide Farbflächen von der gleichen Lichtart beleuchtet, so können trotz gleicher Farbvalenzen (also gleichem Aussehen) die Remissionsfunktionen [also die spektrale Verteilung] verschieden sein. Gleiches Aussehen trotz verschiedener Remissionsfunktionen wird nur von der paarweisen Gleichheit der Farbwert-Integrale bedingt.“



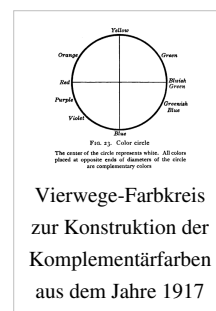
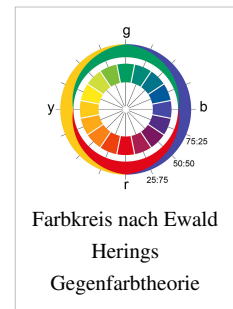
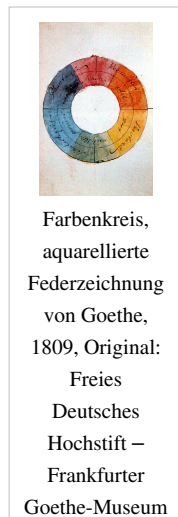
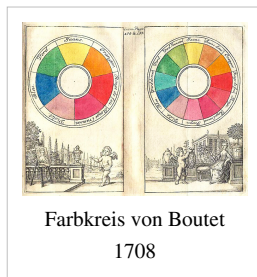
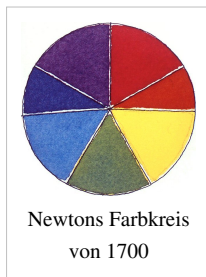
– Manfred Richter^[1]

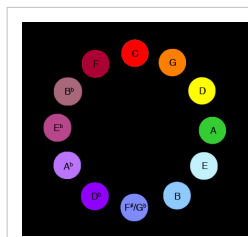
Das Kontrastverhältnis zwischen verschiedenen Farbtönen ist über den Ablauf des Spektrums verschieden. Um eine minimal wahrnehmbare Abstufung zwischen zwei Gelbtönen zu erzielen, muss die Wellenlänge des Lichtes in viel geringerem Maß variiert werden, als um eine gleichgroß empfundene Stufe zwischen zwei Rottönen zu erzielen. Der Farbkreis der additiven Farbmischung zeigt dem normalsichtigen Betrachter kleinere Bereiche für Gelb, Magenta oder Cyan, als dem Farbempfinden entspricht. Der Normalsichtige kann mehr Gelbtöne und Grüntöne als Rottöne unterscheiden.

Die Abstufungen im Farbkreis können prinzipiell nach technischen Geräten geteilt werden, oft können die Stufen nach dem Empfinden besser eingestellt werden. Der subjektive Eindruck „Farbe“ lässt sich am folgenden zeigen: auch wenn sie physikalisch dieselbe Energie (photometrische Helligkeit) hätten werden sie unterschiedlich hell wahrgenommen: Gelb wirkt heller als Blau. Eine Ursache hierfür ist, dass die Kurve des Tagessehens (der Zäpfchen) im Spektralbereich der gelben und grünen Farbreizung liegt.

Andererseits wird die Farbigkeit verschiedener Farbtöne unterschiedlich wahrgenommen: Gelb wirkt „farbiger“ als violett. Verschiedene „farbgebende Systeme“ wie Kunstmalerei, Farbfotografie, Druck, Einfärbungen bedingen unterschiedliche Inputs für den gleichen Output, der zugrundegelegte Farbkreis kann unterschiedlich ausgeführt sein.

Bildergalerie von Farbkreisen





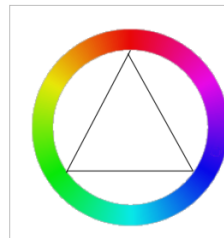
Scriabins Schlüsselfarben
mit Bezug zum
Quintenzirkel



Zwölfteliger Farbkreis
nach Johannes Itten
(1961)



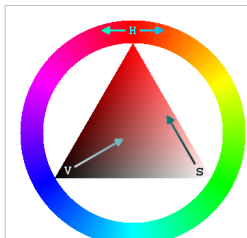
Vom Farbkreis zur
Äquatorebene der
Farbkugel



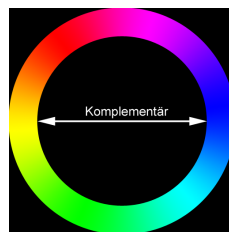
Die Triade der
Grundfarben



Anpassung an einen
RGB-Farbraum



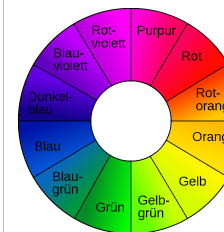
Der Farbkreis: Basis im
HSV-Farbraum



Farbkreis mit
dargestellten
Komplementärfarben
Gelb und Blau für die
additive Farbmischung



Das Basisschema der
Farbenlehre nach
Harald Küppers (1976)



Farbkreis nach Isaac
Newton



Farbkreis mit
CMYK-Werten

Interpretation von Farbkreisen

Farbkreis der additiven (rgb) und der subtraktiven (cmy) Farbmischung

Im Farbkreis stehen sich die Komplementärfarben stets genau gegenüber. Deshalb werden sie auch gelegentlich als „Gegenfarben“ bezeichnet. Das additive Farbsystem beschreibt das Lichtfarbsystem, in dem die Summe aller Farben weiß ist. Beim subtraktiven Farbsystem, das auf Körperfarben aufbaut und im Druck verwendet wird, ist die Summe aller Farben schwarz.

In der nachfolgenden Tabelle wird dies an den Grundfarben der additiven Farbmischung gezeigt:

Farbe	Komplementärfarbe
Rot	Cyan (Türkis)
Grün	Magenta (Purpur)
Blau	Yellow (Gelb)

Die Tabelle kann in beide Richtungen gelesen werden: Rot ist auch Komplementärfarbe zu Cyan. Die textliche Beschreibung gibt hier ein übersichtliches Modell der Farben wieder. Die Schwierigkeit entsteht, wenn dieses Modell in realen Farbmustern erfasst werden soll. Die Beziehungen im Kunsthandwerk, in der Kunstmalerei ist im obigen Kapitel bereits dargelegt. Die Umsetzung dieser Beziehung für die technischen Verfahren und Geräte finden sich in den Modellen des RGB-Farbraumes und des CMYK-Farbraumes.

Angemerkt sei, dass der Farbkreis nur ein Modell zur Darstellung der Farbart ist.

Goethes Ansicht

Im historischen Teil der Farblehre hatte Goethe das Wissen zu den Farben aufbereitet, von der Antike bis zu seiner Zeit. Auf Rat von Runge wählte Goethe den Kreis zur Anordnung aller Farben.

Der Zwölfteilige Farbkreis nach Itten

Am Bauhaus trafen sich bedeutende Meister der bildenden Kunst zur kognitiven Arbeit. Sie suchten dabei nach handwerklichen Vorschriften für die industrielle Massenfertigung und so auch nach Richtlinien zur farblichen Gestaltung für das Malerhandwerk und nach Harmonien für den Kunstmaler. Am bekanntesten wurden die Arbeiten von Johannes Itten.

In Ittens Farbkreis sind die Primärfarben Rot, Gelb, Blau in der Mitte flächengleich umgeben von den daraus gemischten Orange, Grün, Violett, auf dem Kreis ergänzt durch jeweils eine Zwischenstufe.

Der Farbkreis nach Johannes Itten wurde aus Erfahrung und nach Anforderungen der Kunstpädagogik entwickelt, anhand des Mischens von Malfarben. Der Farbkreis soll die Beziehungen der Farben untereinander verdeutlichen, durch das eigene Abmischen wird er „erfahren“. Der Farbkreis besteht aus zwölf „leicht vorstellbaren“ (cite:Itten) Farben mit eigenem Charakter und eindeutiger Beziehung zu den anderen Farben.



Zwölfteiliger Farbkreis nach Johannes Itten
(1961)

Den Kunstmalern war bekannt, dass mit drei Grundfarben die Farbharmonie festzulegen ist. Neben Itten ging auch der Bauhausmeister Paul Klee von den drei Grundfarben Rot, Gelb und Blau aus. Ein Normalsichtiger sei in der Lage, ein rot- und gelbfreies Blau auszuwählen, sowie ein blau- und rotfreies Gelb und ein gelb- und blaufreies Rot. Aus diesen Grundfarben sollen alle anderen Farben des Farbkreises gemischt werden.

Im Farbkreis Ittens werden diese drei Grundfarben, die „Farben erster Ordnung“, im Zentrum angeordnet. Durch Mischung von zwei dieser Grundfarben entstehen die Farben „zweiter Ordnung“: Orange, Violett und Grün. Die Reinheit hängt von der korrekten Reinheit der Farben „erster Ordnung“ ab. Durch Mischen der Farben „zweiter Ordnung“ mit ihren benachbarten Farben „erster Ordnung“ erhält man die Farben „dritter Ordnung“ in sechs Zwischenstufen. Durch Mischen der Farben „zweiter Ordnung“ untereinander erhält man nur noch Tertiärfarben in Braun- und Olivtöne, da immer komplementäre Farbanteile enthalten sind. Die Farben sollen so abgestimmt sein, dass die Abstände gleich erscheinen. Es ergibt sich eine Bewegung von oben „hell“ nach unten „dunkel“. Gegenüberliegende Komplementärfarben sollen zusammen ein Grau ergeben.

Der in Ittens Lehrbüchern abgedruckte Farbkreis lässt sich jedoch nicht abmischen, da die Abbildungen beim Druck nicht durch reale Farbmischung von Ittens Grundfarben entstehen. Wählt man in der Praxis die Grundfarben nach Ittens Anweisungen aus, geraten die Mischfarben etwas trüber und die Komplementärfarben ergeben bestenfalls Graubrauntöne, die auch nicht in der Mitte der Ausgangsfarben liegen müssen. Die von Itten formulierte Idealvorstellung lässt sich also nur in Annäherung durch Mischen verwirklichen.

Ist der Farbkreis korrekt abgestimmt, lassen sich als angenehm empfundene „Farbklänge“ über einfache geometrische Beziehungen finden. Gegenüberliegende Farben bilden „Dreiklänge“ in Form gleichseitiger Dreiecke. Weitere „Farbklänge“ können durch symmetrische Formen vom Sechseck bis hin zum Zwölfeck gebildet werden. Aufgrund der Komplexität der visuellen Wahrnehmung garantiert dieser Formalismus jedoch nicht, dass immer Harmonien entstehen. Eine harmonische Wirkung hängt auch von der farblichen Umgebung ab, sowie der räumlichen Beziehungen von Farbflächen und deren Größenverhältnissen, Eigenhelligkeit und Intensität. Eine Farbharmonie kann kaum „berechnet“ werden, sie muss auf die konkrete Darstellung „abgewogen“ werden. Ein durch Gebrauch trainiertes Farbempfinden führt in der Praxis am ehesten zum Ziel.

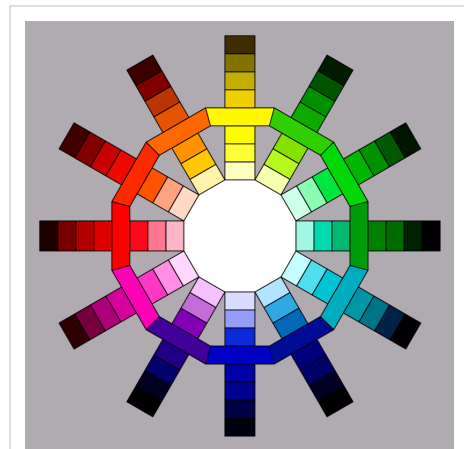
Nach Itten ist ein 48-teiliger oder noch weiter unterteilter Farbkreis für künstlerische Zwecke nicht sinnvoll, da die Differenz etwa zwischen den Farben Nr. 45 und Nr. 46 kaum „vorstellbar“ ist.

Küppers Farbenlehre (Basisschema und Farbensonne)

Harald Küppers kommt aus der Drucktechnik und ist daher um Farbdefinitionen bemüht, die exakte Reproduktionen erlauben. So setzt er sich für genaue Bezeichnungen der Farbeigenschaften ein, da „die Farbenlehre Naturwissenschaft“ sei. Küppers Farbsystem ist eine rechnerische Farbordnung und orientiert sich an den physiologischen Bedingungen des Sehsinns. Er betrachtet Ittens Farbkreis als grundsätzlich „falsch“ und beansprucht für sich selbst, diese Farblehre abzulösen.^[2]

Seine Hauptkritikpunkte an Ittens Grundschema sind: ^[3]

- Ittens Grundfarben seien keine Primärfarben, die „Primärfarbe“ Rot sei eine Mischung aus den Grundfarben Orangerot und Magentarot, seine „Primärfarbe“ Blau sei eine Mischung aus den Grundfarben Cyanblau und Violettblau und seine Primärfarbe Gelb sei eine Mischung der Grundfarbe Gelb mit etwas Orangerot.
- Ittens Farben „zweiter Ordnung“, also die Sekundärfarben, lassen sich nicht aus seinen Primärfarben mischen.
- Die Grundfarben Cyanblau und Magentarot fehlen völlig, das Gelb ist nur näherungsweise enthalten.
- Sich gegenüberliegende Farben seien keine tatsächlichen Komplementärfarben. Mischt man sie, erhält man kein neutrales Grau, sondern eine bunte Tertiärfarbe.
- Es sei didaktisch falsch, die bunten Grundfarben auf einem Kreis gleichberechtigt mit deren Mischungen anzuordnen.
- Die unbunten Grundfarben Weiß und Schwarz als „Nicht-Farben“ zu bezeichnen, sei absurd. Weiß und Schwarz seien die beiden „unbunten Grundfarben“.
- Es sei falsch, ein Basisschema auf weißen Grund zu stellen, da so die unbunte Grundfarbe Weiß nicht dargestellt werden könne. Ein solches Schema müsse auf einem grauen Untergrund stehen.



Farbensonne nach Küppers als didaktisches Hilfsmittel entwickelt



Das Basisschema der Farbenlehre nach Harald Küppers (1976)

Dementsprechend setzt Küppers Ittens didaktischem Schema sein „Basisschema der Farbenlehre“ entgegen. Küppers definiert acht Grundfarben: Gelb, Magentarot, Cyanblau, Orangerot, Grün, Violettblau, und die zwei unbunten Grundfarben Schwarz und Weiß.

Siehe auch

- Liste der Farben im Farbkreis
- Farbenlehre

Didaktische Arbeitsmittel

- Harald Küppers: *Farbenkompass*. Dreiteilige Klappkarte im Postkartenformat. Siebenfarbig gedruckte Abbildungen des Basisschemas, der Farbensonne und der Super-Farbensonne. Muster-Schmidt Verlag, Northeim. 3. Auflage 2005.

Weblinks

- Küppers' Farbenlehre ^[10]

Einzelnachweise

- [1] Manfred Richter: *Einführung in die Farbmatrik*. Walter de Gruyter, Berlin New York 1976. S. 84
- [2] *Farbe und Druckverfahren* (<http://www.uni-bielefeld.de/lili/kumu/farbenlehre-kueppers/de/drucken.html>). Küppers: *Farbe verstehen und beherrschen*, 2004. *Das Gesetz des Sehens* (<http://www.uni-bielefeld.de/lili/kumu/farbenlehre-kueppers/de/sehen.html>): „Die natürliche Ordnung der reinen bunten Farben ist die lineare Anordnung nach Wellenlängen im Spektrum.“
- [3] Küppers' Farbenlehre (<http://www.uni-bielefeld.de/lili/kumu/farbenlehre-kueppers/de/theorie40.html/>)



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Farbmetrik

Die **Farbmetrik** ist die Lehre von den Maßbezeichnungen der Farben. Sie stellt mittels mathematischer Formeln das visuelle Ergebnis einer Farbbetrachtung oder eines Farbvergleichs zahlenmäßig dar.

Unterteilung

- Die niedere Farbmetrik beruht auf den Grassmannschen Gesetzen und beurteilt die Gleichheit von Farben. Hierbei geht es nicht um den primären Farbreiz, sondern um die Farbvalenz, insofern ist die Farbmetrik eine Farbvalenzmetrik. Die additive Farbmischung wendet die niedere Farbmetrik an, da drei Komponenten, entsprechend der Empfindlichkeit der Zapfen, so kombiniert werden, dass die gleiche (hier gewünschte) Farbe erreicht wird.
- Die höhere Farbmetrik fußt auf der Anwendung der niederen Farbmetrik und wendet sich den Farbunterschieden zu. Das Hauptziel ist es, die Maße der Farbvalenzen optimal an die Farbempfindungen anzupassen.

Anwendung

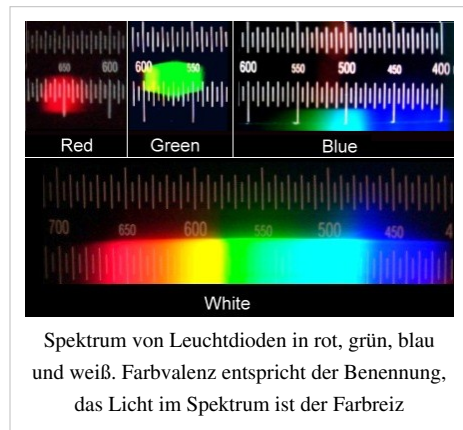
Die Farbmetrik wertet Farbmessungen aus, so dass die visuelle Empfindung „Farbe“ als Farbvalenz mit Farbmaßzahlen fixiert werden kann.

- Die Basis für Farbproduktion im Druck.
- Grundlage für das Rezeptieren bei der Farbnachstellung von Körperfarben und der instrumentellen Abmusterung.
- experimentelle Grundlage der Farbenlehre, sie interpretiert und prüft die Messergebnisse, auf denen Farbmodelle basieren. Somit können Farbräume mittels Farbsystemen vermessen und für die Farbpraxis erstellt werden.

Farbmessung

Farbe ist hier immer Farbvalenz, die vom Auge aus einem Farbreiz wahrgenommene Empfindung. Meßziel ist nicht der (physikalische, spektrale) Farbreiz, sondern die (wirkende) Farbvalenz. Weniger üblich aber exakter ist die Bezeichnung **Farbvalenzmessung**. Die Messung erfolgt prinzipiell nach dem Lambert-Beerschen Gesetz, das jedoch nur bei monochromatischer Messung erfüllt ist. Deshalb werden (möglichst schmale) Intervalle von Wellenlängen gebildet und vermessen.

Möglich ist bislang nur eine instrumentelle Erfassung des *Farbreizes*, die gewünschte numerische Darstellung der *Farbvalenz* als Farbsystem bedingt deshalb einen mathematischen Apparat oder geeignete *materielle* Filterung. Anders gesagt, die Messung erfolgt instrumentell entsprechend der spektralen Zusammensetzung des aufgenommenen Lichts, die Umformung (Abbildung) auf die drei Zapfenabsorptionen erfolgt durch Rechnung. Das Finden der exakten Abbildungsfunktion, der Ausgestaltung des Farbraumes, ist das gegenwärtig noch bestehende Problem der Farbvalenzmessung.



Abgrenzung

Die drei menschlichen Zapfen erbringen zwangsläufig drei Farbvalenzen, die auszuwerten sind. Farbmessung muss eine „sinnesorientierte“ Messung von drei Farbvalenzen sein. Die Bestimmung von anderen Messzahlen, wie der Weißgrad von Papier, die Jodfarbzahl, Bleichgradzahlen oder die Kolorimetrie, sind hier im engeren Sinne nicht als Farbmessung zu verstehen.

Messverfahren

Zur Messung der Farbe (Farbvalenzen) gibt es verschiedene Verfahren.

Gleichheitsverfahren

- Durch technische Geräte oder visuell mit dem Auge wird das Untersuchungsmuster mit einer Serie bekannter Standardmuster solange verglichen, bis die Gleichheit sicher festgestellt ist.
- Es können auch die gewählten (drei) Grundfarben anteilig angeboten werden. Technische Umsetzungen sind der Farbkreisel oder die Maxwellsche Betrachtungsweise. Im ersten Falle wird durch einen schnellen Wechsel die zeitliche Auflösung des Meßgerätes (etwa des Auges) unterschritten, im zweiten Falle wird durch eine Unschärfstellung eine räumliche Verteilung der Grundfarben auf eine (scheinbar) gemeinsame Fläche gebracht und so vom Auge als einheitlicher Farbeindruck wahrgenommen.

Üblicherweise nutzt diese Methode das *Gleichheitsurteil* des normalsichtigen Auges, sie ist also tatsächlich subjektiv. Die Entwicklung teurer technischer Geräte ist durch verbesserte Rechentechnik zugunsten der beiden folgenden Methoden, die jedoch Berechnungen erfordern, eingestellt worden.

Helligkeitsverfahren

Der Farbreiz trifft einen solchen Empfänger, dessen spektrale Empfindlichkeit durch Vorschalten geeigneter Farbfilter den Grundfarben-Spektralwerten entspricht. Das Messelement (Photozelle, heute Photodioden) misst sodann eine „Helligkeit“, die (idealerweise) dem Reiz an den Zapfen entspricht. Der ermittelte Messwert entspricht mithin der Farbvalenz. Am geeignetsten sind Filter nach den Normspektralwertkurven. Wenn die drei so definierten Farbfilter (oder Farbfilterkombinationen) nacheinander vorgeschaltet werden, ergeben sich unmittelbar die drei Normfarbwerte. Messvoraussetzung ist es, dass die Luther-Bedingung eingehalten wird. Die Messgenauigkeit ist davon abhängig, wie gut die spektrale Zusammensetzung der Farbfilter angepasst ist. Nach diesem Prinzip arbeiten Farbsensoren, die in einem Gehäuse drei Fotodioden mit drei vorgeschalteten Filtern besitzen.

Spektralverfahren

Jede Farbvalenz ist das Integral über alle spektralen (monochromatischen) Farbvalenzen. Über den Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes wird das Spektrum (also zugehörige Intensitäten) der zu untersuchenden Lichtfarbe oder Körperfarbe ausgemessen. Bei Körperfarben muss auch die beleuchtende Lichtart einbezogen sein. Durch eine über hundertjährigen Geräteentwicklung (Spektralphotometer, Spektrometer) mit angeschlossener Rechentechnik machen leistungsfähige Geräte dieses Verfahren zum heute meistens angewandten.

Auswertung

Für die Auswertung der spektralen Zahlenwerte vom Messgerät ist auf gewünschte Farbkoordinaten umzurechnen. Durchgesetzt haben sich die von der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE) definierten Normspektralfarbwerte \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} . Diese Basiszahlen stehen im Abstand von einem Nanometer tabelliert zur Verfügung.

Gewichtsordinatenverfahren

Grundlage dieses Berechnungsverfahren ist, dass die Farbvalenz \mathfrak{F} aus der Summe der spektralen Farbvalenzen \mathfrak{S} (λ) errechnet, den vom Auge empfundenen Farbraum aufspannt. Dabei sind üblicherweise die Normfarbwerte zu bevorzugen. Diese sind von der CIE für das Normvalenzsystem tabelliert.

$\mathfrak{F} = r * \mathfrak{R} + g * \mathfrak{G} + b * \mathfrak{B}$ nach den Gesetzen von Transformationen im Vektorraum, also auch

$\mathfrak{F} = X * \mathfrak{X} + Y * \mathfrak{Y} + Z * \mathfrak{Z}$, wenn das eingeführte Normvalenzsystem benutzt wird.

Für die Berechnung lässt sich dies nun auflösen für jeweils den wellenlängenindizierten Werte A_λ als A_w an der Stelle $\lambda=w$. Für die spektrale Strahldichte der Lichtquelle A_λ also S_w etc. und somit integriert $d\lambda$ hier dw .

$$\mathfrak{F} = \int_{380}^{760} S_w \mathfrak{S}_w dw = \int_{380}^{760} S_w (\bar{x}_w \mathfrak{X} + \bar{y}_w \mathfrak{Y} + \bar{z}_w \mathfrak{Z}) dw$$

Für die praktische Berechnung ist vom Integral auf die Summe umzustellen $d\lambda \rightarrow \delta\lambda$. Je nach geforderter Genauigkeit sind in der Farbmessung heute Messintervalle von 10 nm üblich, einfache Farbmessgeräte benutzen noch 16 Werte im 20-nm-Abstand. Bei Benutzung der Tabellen in 5-nm-Abstand lassen sich in Übereinstimmung mit ISO- und DIN-Norm für höhere Ansprüche 5 nm wählen.

$$\mathfrak{F} = \left(\sum S_w \bar{x}_w \right) \mathfrak{X} + \left(\sum S_w \bar{y}_w \right) \mathfrak{Y} + \left(\sum S_w \bar{z}_w \right) \mathfrak{Z}$$

Die Addition des Produktes $S_\lambda \bar{x}_w$ ergibt nun den Farbwert X, entsprechend erhält man mit $S_\lambda \bar{y}_w$ den Farbwert Y und mit $S_\lambda \bar{z}_w$ dann Z. Allerdings wird noch normiert, meist auf $Y=100$, also mit $k = \sum S_w \bar{y}_w$.

Allerdings wird bei Körperfarben oder Aufsichtsfarben die von der Lichtquelle ausgehende Strahlung S_λ durch die spektralen Eigenschaften der betreffenden Oberfläche verändert. Für die Farbreizfunktion $\varphi(\lambda)$ die das Auge trifft, die Farbe i.e.S., muss also diese „beeinflusste“ spektrale Strahldichte eingesetzt werden. Dies ist entweder die spektrale Remissionskurve $\beta(\lambda)$ bei Oberflächenfarben oder die spektrale Transmissionskurve $\tau(\lambda)$ bei Aufsichtsfarben. Der spektrale Farbreiz φ_λ ist

für den spektralen Remissionsgrad nunmehr $\varphi_\lambda = S_\lambda * \beta_\lambda$ und

für den spektralen Transmissionsgrad entsprechend $\varphi_\lambda = S_\lambda * \tau_\lambda$

Und letztlich erhält man die Farbwerte durch entsprechende Gewichtung der Ordinatenwerte des Spektrums

$$\begin{aligned} X &= \sum_{380}^{760} \varphi_\lambda \bar{x} \\ Y &= \sum_{380}^{760} \varphi_\lambda \bar{y} \\ Z &= \sum_{380}^{760} \varphi_\lambda \bar{z} \end{aligned}$$

Auswahlkoordinatenverfahren

Bei diesem Verfahren entfällt durch Umwertung der Integrale die Multiplikation. Unter Anwendung eines Satzes von tabellierten Normwerten wird an geeigneten Stützstellen der spektrale Messwert ermittelt. Es werden hier die ausgewählten β_λ bzw. τ_λ bestimmt und so ist nur eine Addition dieser Zahlenwerte nötig.

Spektralbandverfahren

Andersherum kann auch die Strahlungsverteilung der Lichtquelle zusammengefasst werden und in diesem Spektralintervall gemessen werden. Entsprechend ergeben sich die Farbwerte durch Ausmessung der Farbreize in diesen Intervallen.

Farbmessgeräte

Seit den 1980er Jahren sind Farbmessgeräte zumeist Spektralphotometer, die die Spektralkurve automatisch registrieren und dann in auf dem eingesetzten Chip die notwendige Integration der erhaltenen Messwerte auch ausführen. Die Ausgabe der Messwerte kann selbstverständlich dann in verschiedenen Koordinaten (entsprechend dem gewünschten Farbraum) oder auch als Spektralkurve erfolgen. Durch Speicherung lassen sich dann auch die Farbabstände zwischen der Farbvorlage und einer Serie von Mustern ausgeben. Durch Umrechnung auf verschiedene (bevorzugt normierte) Lichtarten lässt sich auch der Metamerieindex von Vorlage zu Probe errechnen.

Literatur

- Manfred Richter: *Einführung in die Farbmetrik*. 1984 ISBN 3-11-008209-8
- Kurt Schläpfer: *Farbmetrik in der grafischen Industrie* 2002 ISBN 3-9520403-1-2
- Richard S. Hunter: *The measurement of appearance* 1987 ISBN 0-471-83006-2

Farbmittel

Farbmittel ist nach DIN 55943 die Sammelbezeichnung für alle farbgebenden Stoffe.

Definition

Farbmittel werden einerseits nach ihrer chemischen Struktur in anorganische und organische Farbmittel eingeteilt. In beiden Gruppen kann nach der Herkunft in natürliche und synthetische, oder nach der Farbqualität in weiße, bunte und schwarze Farbmittel, sowie in Effekt- und Leuchtfarbmittel gegliedert werden.

Anorganische Farbmittel sind fast durchweg Pigmente. Die organischen Farbmittel werden nach ihrer Löslichkeit im jeweiligen Anwendungsmedium in unlösliche Pigmente oder lösliche Farbstoffe unterteilt.

Pigmente

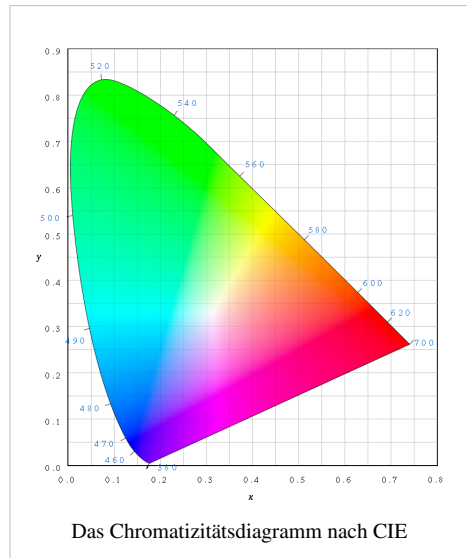
Pigmente sind im Anwendungsmedium unlösliche Farbmittel. Hauptanwendungen sind Dispersionsfarben, Lacke, Kunststoffe und Druckfarben. Es wird mit hochechten Pigmenten eingefärbt, wenn Migration verhindert werden muss. Jedoch sind nicht alle Pigmente vollkommen migrationsstabil. Aufgrund des Vorliegens als Partikel besitzen Pigmente ein höheres Echtheitsniveau als Farbstoffe.



Das Farbmittel Purpur (Dibromindigo) und seine Ausfärbung auf einem Stoffstück

Farbstoffe

Farbstoffe sind im Anwendungsmedium lösliche Farbmittel. Sie sind in Wasser oder organischen Lösungsmitteln *löslich*. Der Einsatzzweck der genutzten Lösungsmittel ist dabei entscheidend. Sie werden in der Textilfärbung, in Schreibgeräte- und Inkjet-Tinten verwendet. Auch zum Einfärben von Papier und Kunststoffen kommen Farbstoffe zum Einsatz.



Abgrenzung

Je nachdem, wie sich das Farbmittel in der konkreten Matrix verhält, handelt es sich also um ein Pigment oder einen Farbstoff. Eine einzelne chemische Substanz kann also Pigment und Farbstoff sein.

Echtes Indigo zur Färbung von Jeans ist als gefärbtes Produkt ein Pigment, da es in der Baumwollfaser unlöslich ist. Diese Unlöslichkeit ist der Grund der geringen Reibechtheit. Damit mit Indigo gefärbt werden kann, muss es verküpt werden. Bei der Verküpfung wird der Indigo zu seiner löslichen "Leukoform" reduziert und ist in diesem Zustand also in Wasser löslich und somit ein Farbstoff, aber nicht mehr dieselbe chemische Substanz.

Alternative Einteilung

Eine andere Einteilung erfolgt direkt nach der Erzeugung in

- *Synthetische Farben*, die industriell, gewerblich oder auf sonstige Art hergestellt werden und
- *Naturfarben*, dies sind organische oder anorganische Materialien, die unmittelbar aus Pflanzen, Terteilen, aus Erden oder Gestein gewonnen werden. Dazu gehören viele Weißmineralien und auch die Erden, auch färbende Substanzen wie Safran, Indigo oder der echte Purpur.

Spezialfarben

Spezialfarben sind Farbmittel mit besonderen Eigenschaften, etwa weil sie ihren Farbton unter dem Einfluss von physikalischen und chemischen Größen ändern.

- Temperaturabhängige Farbmittel: siehe Thermochromie
- UV-Licht: Fluoreszenzfarben
- Auf Lichteinfluss reagierende Farbstoffe: Photochrome Farbstoffe
- Säure-/Base-Reaktion oder Redox-Vorgänge anzeigende andere chemische Stoffklassen identifizierende Indikatorfarben
- Auf Druckänderung reagierende Farbmittel: Halochromie
- Färbende Zusätze in der Pyrotechnik, siehe *Leuchtsatz*.

Siehe auch

- Liste der Pigmente
- Liste der Farbstoffe

Literatur

- Kurt Wehlte: *Werkstoffe und Techniken der Malerei*. Otto Maier Verlag, Ravensburg 1967, ISBN 3-473-48359-1 (früher: ISBN 3-473-61157-3).
- DIN 55943 und DIN 55944.

Weblinks

- Ingo Klöckls Farbchemie-Seiten ^[1]
- Volkert Emrath: Alte Pigmente ^[2]

Referenzen

[1] <http://www.2k-software.de/ingo/farbe/farbchemie.html>

[2] http://www.emrath.de/rest_ix.html

Farbnachstellung

In der **Farbnachstellung** wird ein gewünschtes Farbmuster mit einem gegebenen Farbmittelsatz möglichst genau reproduziert.

Grundlagen

Farbnachstellung bedeutet, eine Farbe als Farbort in einem Farbsystem zu bestimmen und im Gamut (dem machbaren Farbraum) darzustellen: Diesen Vorgang bezeichnet man als **Innere Farbmischung**. Folgende Beispiele sollen den Sachverhalt illustrieren:

- Farbrezeptierung: Der Textilproduzent erhält die auf Papier gezeichnete Vorlage des Designers und die Produktion soll (innerhalb vereinbarter Toleranzen) den modischen Farbton erfärbaren, indem die verfügbaren (wirtschaftlich vertretbaren) Farbstoffe eingesetzt werden.
- Bildverarbeitung: Das bereitgestellte Foto soll im gedruckten Werbekatalog die gleiche Farbbrillanz besitzen, Colormanagement.
- Reproduktion: Die gescannte und am Computer bearbeitete Vorlage soll farbgerecht in der Illustrierten wieder erscheinen.

Grundlage für Farbnachstellungen ist die Tatsache, dass (je nach anstehender Aufgabe) im emittierten oder im remittierten Licht ein sichtbarer Anteil vorhanden ist. Diese elektromagnetische Strahlung im Bereich von 380 nm bis 780 nm fällt in den Zapfen des Auges auf Rezeptoren, die die einfallende Energie in Nervenimpulse umsetzen. Entsprechend den drei Zapfentypen ergibt sich ein Farbreiz am Sehnerv, der sich in einem dreidimensionalen Messraum abbilden lässt (genauer hierzu siehe Farbraum). Für das menschliche Individuum entsteht die optische Wahrnehmung *Farbe*. Der „neuronal“ Trick: aus einer Intensitätsverteilung über die „sichtbaren Wellenlängen“ wird eine Summierung über die Empfindlichkeitskurven der R-, G- und B-Zapfen zu einem Reiz, zu einem Farbreiz, zu einer Farbwahrnehmung gewandelt. Dieser visuelle Vorgang wird bei der Farbnachstellung genutzt.

Ausführung

Mit einem Spektral-, einem Dreibereichsgerät oder schlicht mit dem Auge wird der Farbreiz der Vorlage ermittelt und mit passenden Farbmitteln für die gewünschten Substrate (Materialien wie Textilien, Druckfarbe, Papier, Lacken, Monitorleuchtstoffe) oder Lichtfarben in einer ersten Versuchsprobe umgesetzt. Diese Probe soll beim Ausmessen mit gleichen Geräten eine hinreichend genaue Reproduktion der Vorlage ergeben.

Heute werden üblicherweise Spektralgeräte benutzt, die aus dem Spektrum der Mustervorlage 16 oder 31 Stützstellen ermitteln und diese werden nach den Normvalenzen und einer vereinbarten Lichtart in die drei Koordinaten {X,Y,Z} umgerechnet. Jeder andere Farbraum ist ebenfalls geeignet. CIELAB hat (gegenwärtig) den Vorteil, dass Abweichungen im euklidischen Abstand nahezu dem visuellen Empfinden entsprechen.

Anders gesagt: Um ein Farbmuster (Körperfarbe) nachzustellen, wird es zunächst farbmetrisch vermessen. Für praktische Zwecke reichen 31 Stützstellen im sichtbaren Spektrum (400 nm bis 700 nm), entsprechend den CIE-Tabellen für Normspektralfarbwerte. Richtungsabhängige Effekte, wie der Glanz, werden durch die Messanordnung eliminiert, der Grauwert ist dabei Teil dieser farbmetrischen Messung.

Das Originalspektrum, als Emissionsspektrum oder Remissionsspektrum, soll nun so nachgestellt werden, dass von der Reproduktion der gleiche Sinnesindruck entsteht, dass die Farbvalenzen gleich sind. Aus einem vorhandenen Satz von Farbmitteln werden die Anteile (Konzentrationen der Stoffe, Intensitäten der Lichter) so bestimmt, dass der gleiche Farbreiz wie vom Originalspektrum auf den Sehsinn trifft. Die Schwierigkeit besteht einerseits darin, dass dieser Satz an Farbmitteln durch den Einsatzzweck beschränkt wird. Andererseits sind dadurch nicht originale Farbmittel möglich und es muss zusätzlich für Körperfarben die Beleuchtung definiert sein, meist eine Normlichtart.

Grenzen der Reproduktion von Farben

So ist die Nachstellung nur für reine *subtraktive Farbmischung* sowie *autotypische Farbsynthese* eindeutig möglich. Durch die meist begrenzte Palette technischer Möglichkeiten ist üblicherweise nur eine metamere Nachstellung zu erreichen.

Bei additiver Farbmischung (Computermonitor, Fernseher) sind Strahler mit ihrem jeweiligen Frequenzspektrum Ursache für den Farbeindruck, die Intensitäten der Einzelelemente werden überlagert und verursachen einen bestimmten Farbreiz. Auch dabei ist das technisch Machbare durch die Palette vorhandener Materialien begrenzt. Für Monitore ist das technisch Machbare durch Leuchtstoffe begrenzt, die einerseits wirtschaftlich zu produzieren sind, andererseits eine ausreichende Lebensdauer haben.

Da für „Farbe“ immer das Auge, damit der Mensch notwendig ist, ist auch die Zielstellung für Nachstellungen definiert. Prinzipiell kann der Colorist allein durch visuellen Vergleich, also „per Auge“, die Nachstellung ausführen. Er erstellt eine Reihe von Proben, die idealerweise eine zunehmend besser an den Originalfarbton annähern. Individuelle Unterschiede in der Wahrnehmung des Farbreizes unterschiedlicher Probanden treten allerdings in den Vordergrund. Was im CIE-Farbraum als mittlerer *Normalbeobachter* definiert ist, ist im visuellen Abgleich durch den jeweiligen *Einzelbeobachter* ersetzt. Differenzen zwischen dem trainierten „Coloristenaugen“ und der Wahrnehmung des unternehmenden Auftraggebers sind nicht auszuschließen. Einschränkend ist anzumerken, dass der CIE-Versuch auf 17 Versuchspersonen beruhte. Eine Nachstellung oder gar eine maschinelle Farbrezeptierung ist mit farbmetrischer Unterstützung leichter auszuführen. Die Farbmetrie ist durch die bessere Rechentechnik schneller geworden, die Theorie der Farbräume ist aber noch nicht abgeschlossen.

Abgrenzung

Es bleibt hinzuzufügen, dass hier nur Nachstellung der Farbe angestrebt und beschrieben ist, die beim Begriff Farbe nach DIN 5033 ausgelassenen virtuellen Einflüsse (Glanz, Umgebungsfarbe) können gleichfalls von Einfluss sein. Eine am PC-Bildschirm erarbeitete Designvorlage hat eine andere Struktur als das T-Shirt auf dem der Entwurf gedruckt werden soll. Möglicherweise wurde aus dem PC auf Papier gedruckt um dem Verkäufer im Printshop zu zeigen wie das strahlende, mediterrane Orange des Logos vom Shirt-Drucker einstellen soll.

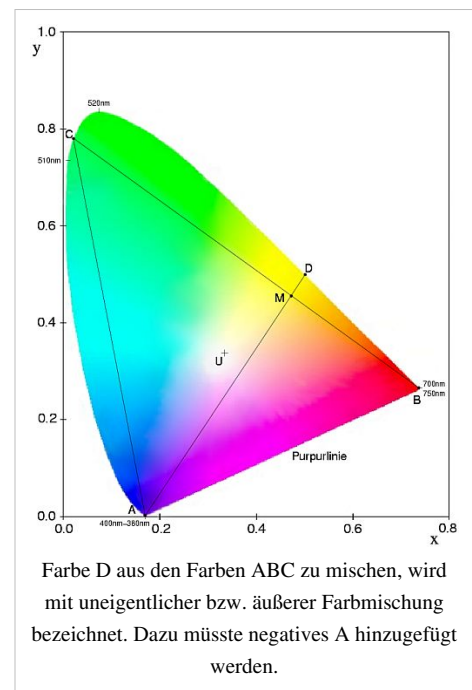
Solange für die angestrebte Nachstellung einer Farbe nicht die identischen Farbmittel, die identischen Substrate und die identischen Licht- und Umgebungsbedingungen bestehen, kommt es zu Komplikationen. Eine Schwierigkeit ergibt sich daraus, dass die visuelle Realität der an 31 Stützstellen gemessenen Intensitäten, die im Auge mittels dreier Empfindlichkeitskurven aufgenommen wurden, nicht durch Angleichen an jeder dieser 31 Stützstellen angepasst werden kann. Vielmehr stehen für die Farbnachstellung nur reelle Färbemittel bereit, deren Angleichung an einer dieser 31 Stützstellen auch Einfluss auf die anderen Intensitäten nimmt.

Innere/Äußere Farbmischung

Nach dem ersten Grassmannschen Gesetz ist Farbe für den Menschen eine dreidimensionale Größe: Mit lediglich drei voneinander unabhängigen Farbtönen ist es möglich, jede beliebige andere Farbe durch *Farbmischung* darzustellen (Beispiele in Additive Grundfarbe). Farbtöne sind voneinander unabhängig, wenn keine Mischung von jeweils zwei dieser Valenzen die dritte ergibt.

In der CIE-Normfarbtafel – einem Schnitt durch den visuellen Farbraum – können diese Zusammenhänge übersichtlich dargestellt werden. Auf Geraden zwischen dem *Unbuntpunkt* U (im CIE-Diagramm liegt hier der Weißpunkt) und einer *Spektralfarbe* liegen Farben mit gleichem Farbton. Sie sind umso gesättigter (brillanter), je weiter die Anteile der Normfarbvalenzen vom Unbuntpunkt entfernt liegen. Die Farben maximaler Farbsättigung sind die Spektralfarben und die Farbtöne der *Purpurlinie*.

Die Verlängerung der Gerade vom Unbuntpunkt durch die gewünschten Farbe bis zum Rand der Farbtafel bestimmt die farbtongleiche Wellenlänge. Auf der Purpurlinie liegen Mischfarben zwischen Violett und Rot, hierfür ist solche Wellenlänge nicht zu bestimmen. Durch Gerade über den Weißpunkt hinaus verlängert ergibt die farbtongleiche Wellenlänge mit negativem(!) Vorzeichen:



Die Farbe D in der Abbildung lässt sich nicht aus A, B und C mischen, weil D nicht im Dreieck ABC liegt, sondern außerhalb.

Die „Eckfarben“ A, B und C (die den Gamut aufspannen) sollen möglichst am Rand der „Farbsohle“ liegen, damit die Anzahl der nicht darstellbaren Farben gering bleibt. Das ist bei Fernsehbildschirmen oder Computermonitoren aus technischen Gründen nicht möglich (Additive Grundfarbe).

Durch Abmischen von B mit C kann die Farbe M erreicht werden. Überlagerung von D mit violetterm Licht A erzeugt ebenfalls M. Daher muss man negatives Violett A zu M zumischen, um das Licht D zu erhalten. Dies ist die *Äußere Farbmischung* oder auch *uneigentliche Farbmischung*.

Liegt die zu ermischende Farbe im Dreieck A, B, C (dem *Gamut*), so kann die Farbe gemischt werden. Dies ist die *Innere Farbmischung*, auch oft als *eigentliche Farbmischung* bezeichnet.

CIE-Normfarbvalenzen

Die gerne zitierte Aussage: *Jede beliebige Farbempfindung kann mit drei unabhängigen Farbvalenzen nachgebildet werden* unterschlägt die notwendige Bedingung *unter der theoretischen Annahme (nicht-existenter) negativer Lichtfarben*.

Da negative Spektralwerte nur rechnerisch auftreten können, gingen die Bemühungen dahin, dass von der CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) ein System auf Normfarbvalenzen mit den Bezeichnungen X (=Rot-), Y (=Grün-) und Z(=Blaugehalt einer Farbe) definiert wurde.

Die geräteunabhängigen Normfarbvalenzen XYZ werden für die Ausgabe auf einem Gerät mit additiver Farbmischung, wie einem Monitor, in RGB, für subtraktiv mischende Systeme (Drucker) in CMY oder CMYK umgerechnet.

Für diese Transformationen existieren im Allgemeinen keine definierten Gleichungen (Gamut-Mapping). Selbst wenn diese zwischen Farbräumen festgelegt sind, kann bei der Konvertierung durch eine Bereichsüberschreitung ein Problem auftreten, das sich in einer Farbverzerrung äußert.

Bisherige optimale Techniken setzen die benötigten Farben aufwändig mit manuellen Methoden um. Üblicherweise ist eine Liste von Zuordnungen vorhanden, die in der näheren Umgebung dieser Stützstellen linear optimiert werden. Es kann der visuelle Eindruck am Monitor mit einer Farbvorlage durch Anpassen der Farbtemperatur optimiert werden. Die Lösung ist die Vorgabe von Normen durch das International Color Consortium, mit denen Ein- und Ausgabegeräte kalibriert werden könnten.

Nur die simple dimensionale Reduktion von Zustandsvektoren durch Abbildung in den Farbraum zu verwenden, ist aufgrund metamerer Effekte problematisch.

Technische Umsetzung

Außer der farblichen/coloristischen Anforderung an die farbgebenden Mittel treten oft auch technische, wirtschaftliche und Echtheitseigenschaften bei der Nachstellung hinzu. Die verfügbaren Farbmittel besitzen eine bestimmte Repräsentation auf der xy-Farbfläche. Begrenzend sind immer die weiteren technischen, physikalischen, chemischen Anforderungen an die farbgebenden Mittel. Ist hohe Lichtechtheit gefordert, entfallen viele farblich möglichen Stoffe. Beispiel sei der Vierfarbdruck: Schwarz ist relativ einfach durch Ruß als Pigment herzustellen, das rotstichige Blau wird mit Reflexblau und auch Gelb mit vergleichsweise stabilen Pigmenten realisiert. Für das farblich nötige violette Pigment ist aber eine geringe Palette möglicher Pigmente vorhanden, die technisch aufwändig zu fertigen sind. Damit ist aber im CMYK-System die realisierbare Farbpalette eingeschränkt.

Für den 4-Farbendruck begrenzt die Maschine die Anzahl der Farbmittel. Die definierten Skalenfarben bilden hier den Gamut und begrenzen die möglichen Ergebnisse. Eine uneigentliche Farbmischung ist hier nicht möglich, es gibt keine negativen Remissionsergebnisse. Druckfarben wie sie beispielsweise für Unternehmensfarben (Corporate Identity) benötigt werden, können außerhalb des Gamuts liegen und müssen somit als Schmuckfarben mit geeigneten Pigmenten angefertigt werden.

Nachstellungen für hochwertige Kunstdrucke werden mittels 7 Farben, plus dem Papierweiß, erreicht. Damit wird der Gamut erweitert.

Für hochwertige Fotodrucker gibt es 2 Farbkartuschen. Neben dem üblichen Cyan, Magenta und Gelb ist im Schwarzschaft eine zweite Kartusche mit ergänzenden Farbtinten eingesetzt.

Im Weißbereich ist das Nachstellen von (naturgemäß gelblichen oder vergilbten) Bleiweißfarben mit den hochweißen (modernen und dauerhaften) Weißfarben auf Titandioxid-Basis ohne weitere Zusätze nicht möglich.

Weblinks

Java-Präsentation zur Farbnachstellung ^[1] (eigentliche/uneigentliche Farbmischung)

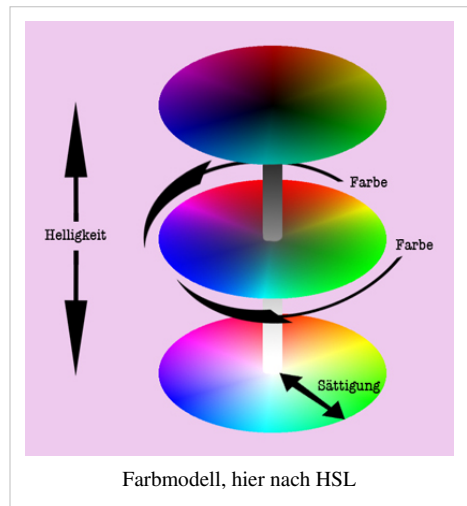
Referenzen

[1] http://www.harald-binder.de/psy_java/Farbmischer/farbmischer.html

Farbraum

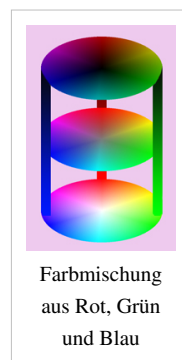
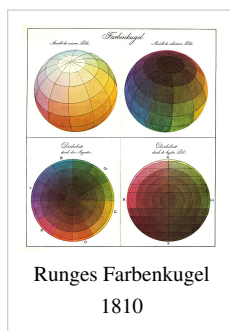
Alle Farben eines **Farbmodells**, die durch eine farbgebende Methode tatsächlich ausgegeben werden können, werden dreidimensional - als **Farbraum** - dargestellt. Jede farbgebende Methode hat ihren eigenen Farbraum. Eine Darstellung aller **Farborte** eines Farbmodells bildet den **Farbkörper**.

Alle Verfahrensweisen und damit verbundenen Geräte und Materialien, die Farbe zur Darstellung bringen können, werden farbgebende Methoden genannt. Solche Verfahren sind Drucker, Monitore, Ausbelichtungen, Kunstdrucke und Lackierungen.



Definitionen

Verschiedene Darstellungen von Farbmodellen und Farbräumen





Farbe

Farben, in der Farbmimetik genauer als Farbvalenz bezeichnet, beruhen auf Farbreizen, die sich durch ihre spektrale Zusammensetzung unterscheiden. Durch die Notwendigkeit, diese Unterschiede exakt definieren zu können, wurden verschiedene Farbmodelle entwickelt. Grundlage dafür sind die Graßmannschen Gesetze. Jede Farbe kann durch einen Farbnamen (beschreibende Worte), aber auch durch den numerischen Farbort definiert werden. Je nach Farbmodell kann nach Helligkeit, Sättigung und Farbton, aber auch nach Hell-/Dunkel-, Rot-/Grün- und Gelb/Blau-Wert mit drei derartigen Größen die Farbe eindeutig beschrieben sein.

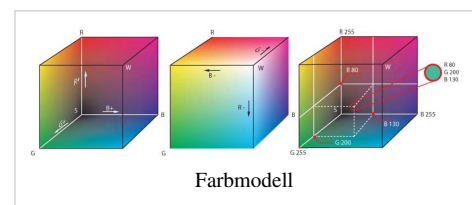
Farbsystem

Ein Farbsystem ist die Systematik zur Anordnung der Farbvalenzen, die auf unterschiedliche Art Farben erzeugen. Durch „Mischung“ von Licht als Lichtfarben oder die Verwendung von Farbmitteln auf einem Trägermaterial als Körperfarben. Je nach Anwendungszweck können unterschiedliche Anzahlen von Grundfarben genutzt werden, mindestens drei, aber auch vier oder mehr farbgebende Substanzen werden genutzt. Diese sind allerdings nicht mehr unabhängig voneinander.

Das Farbsystem stellt immer nur das Grundprinzip einer Farbmischung dar, nie die technische Umsetzung der farbgebenden Methode. Am deutlichsten wird das an der Farbe *Weiß*. Diese kann, je nach verwendeter farbgebender Methode gleißend und blendend, aber auch matt und stumpf sein. Beide Arten *Weiß* darzustellen, widersprechen nicht dem zugrunde liegenden Farbsystem.

Farbmodell

Das Farbmodell entsteht aus dem abstrakten Farbsystem meist dreidimensional für die praktische Darstellung, die unterschiedlicher Form sein kann. Innerhalb der Modelle sind allen Farben eindeutige Zahlenwerte, die Farborte, zugeordnet.



Wird der Farbort einer Farbe mit Hilfe einer Software innerhalb des gleichen Farbmodells geändert, so entstehen Interpolationsverluste. Auch durch den Übertragungsweg bis zur farbgebenden Methode entstehen diese Qualitätsverluste. Dies kann nicht verhindert, nur verringert werden. Die Anzahl der Differenzierungsstufen innerhalb des Farbmodells zu erhöhen und ein geeignetes Farbmanagement sind dabei am wirkungsvollsten. Das eingesetzte Farbmodell ist der Träger der Information der Schärfe und so beeinflusst wiederum das Modell das Ergebnis der Schärfe in der Fotografie.

Farbkörper

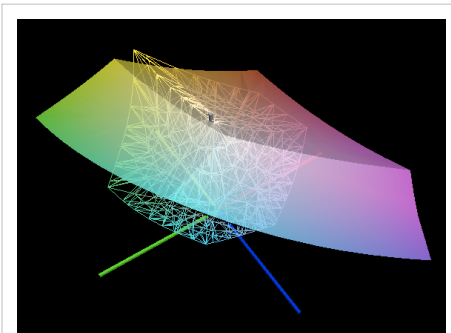
Der Farbkörper ist der geometrische Körper, mit dem sich das Farbmodell darstellen lässt. Für Runge war es die Kugel, durch Schrödinger wurde der Farbkörper nach Rösch angeregt, Oswald wählte den Doppelkegel und Küppers das Rhombendodekaeder. Er ist eine systematische Anordnung im dichten, kontinuierlichen Zusammenhang aller Farborte des zugrunde gelegten Farbsystems.

Farbort

Der Farbort ist der Punkt im oder auf dem Farbkörper, und wird im Farbraum mit geeigneten Koordinaten in seiner Lage beschrieben. Dieser Ort repräsentiert die vereinbarte Farbe. Farborte sind in Farbräumen kontinuierlich beschreibbar, ihre reale Präsentation in Farbatlasen ist dagegen naturgemäß nur diskontinuierlich möglich.

Farbraum

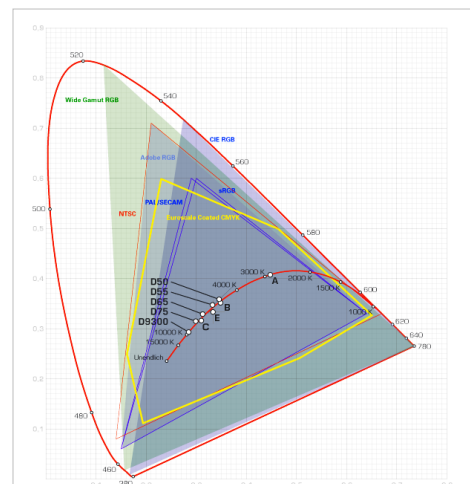
Der Farbraum einer farbgebenden Methode umfasst möglichst alle Farben, die innerhalb des Farbmodells darstellbar sind. Bei der Verwirklichung der Farbdarstellung sind zwangsläufig alle farbgebenden Methoden verlustbehaftet. Einige Farben haben zwar einen definierten Farbort, sind aber mit den verfügbaren Farbmitteln nicht darstellbar. Die darstellbaren Farben bilden innerhalb des Farbmodells einen Körper, auch als Gamut bezeichnet. Dieser Körper wird Farbraum genannt, der Farbraum kann im idealen Falle das ganze Farbmodell erfüllen. Farbräume dienen zur Visualisierung von Differenzen zwischen einem Idealzustand und der geforderten Realität.



Bildschirm- und Druckmaschinen-Gamut im CIELAB-Farbraum

Überblick

- Die Menge der in einem Farbraum präsentierten Farben ist die Gesamtheit aller Farbreize, die vom Sehsinn wahrgenommen werden. So bildet beispielsweise die Menge der Farben, die an einem Bildschirm sichtbar sind, einen Farbraum, in diesem Falle den Geräte-Farbraum des Bildschirms mit den Koordinaten R(ot), G(rün) und B(lau).
- Es können auch mehrere (materielle) Basisfarben den jeweils definierten und begrenzten Messraum dieser Farben aufspannen. Als Grundfarben eines Farbmodells dürfen nur solche Farbvalenzen gewählt werden, die nach den Graßmannschen Gesetzen als unabhängig voneinander definiert sind.
- Farben werden durch ein *Farbmodell* quantifiziert. Ein Farbmodell ist ein Koordinatensystem mit Basiskoordinaten entsprechend den gewählten Farbvalenzen. Die Zahlenangaben sind Ortsvektoren des Farbmodells, ihre Angabe kann in Form eines Tupels (hier 3-Tupel) erfolgen.
- Farbräume sind ein notwendiges Werkzeug in der Farbmatrik, bei der gerätebedingten Umwandlung von Reproduktionen und Design (Colormanagement) und Gegenstand verschiedener Farbenlehren. Ein Farbraum unterliegt als „Modell der Wirklichkeit“ den Grenzen seiner Definition.



Die Lage einiger technischer Farbräume auf der xy-Chromazitätsebene

- Ziel der Gestaltung von Farbräumen ist, innerhalb der Modellgrenzen Übereinstimmung mit der Farbwahrnehmung des Menschen zu erreichen. Dabei müssen Eingabegerät und Ausgabegerät aufeinander abgestimmt werden. Durch verbesserte farbgebende Methoden entstehen wiederum neue Anforderungen an das Colormanagement.

Farbempfindung

Das menschliche Auge besitzt im Regelfall drei Zapfenarten, die als farbempfindliche Rezeptoren das Sehen „in Farbe“ ermöglichen. Die spektrale Empfindlichkeit der Zapfen deckt seinerseits ein Teilintervall des sichtbaren Lichtes ab.

Das Farbsehen kann dreidimensional beschrieben werden. Diese Feststellung ist im 1. Graßmannschen Gesetz begründet, damit ist ein Farbraum (hier als Raum der Farben) dreidimensional. Die Ursache dafür ist die Reizintensität an den drei Farbrezeptoren. Die Farbvalenz (umgangssprachlich „die Farbe“) wird durch drei Vektorlängen zum Farbort dargestellt, einem Punkt im Farbraum. Die Dreidimensionalität war Kunstmalern schon lange bekannt und wurde von Thomas Young erstmals mit der Drei-Farben-Theorie beschrieben.

Bei der Nachstellung von Körperfarben ist eine spektralgerechte Wiedergabe kaum möglich, da unterschiedliche Materialien oder Gerätesysteme oder die verschiedenen farbgebenden Methoden kaum gleiche Eindrücke hinterlassen, zudem ist die (reale) Farbe von Umgebungsbedingungen beeinflusst. Durch das Phänomen der Metamerie wird beschrieben, dass Farben auf verschiedene Arten aus drei Grundfarben entstehen können. So können Farben mit drei Grundvalenzen für praktische Zwecke meist ausreichend genau dargestellt werden, solange die Bedingungen nicht zu stark verändert sind. Die Vielfalt der spektralen Zusammensetzungen wird für das Individuum auf drei wahrnehmende Zapfenwerte abgebildet.

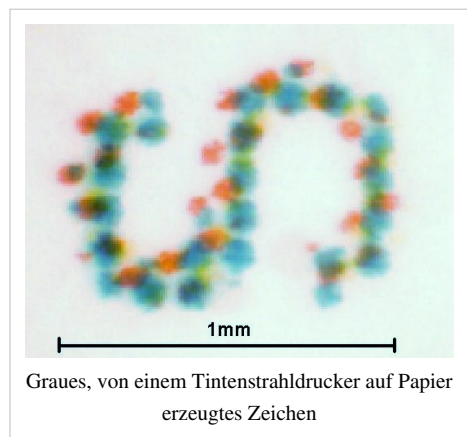
Übertragung von Additiv zu Subtraktiv

Durch die selbstleuchtenden Eigenschaften der additiven Farbmischung entsteht ein hoher Kontrastumfang. Die „Strahlkraft“ dieser Luminanz vermittelt nicht nur einen hohen Schärfeeindruck, sondern lässt auch Farbdarstellungen zu, die nur durch additive Farbmischung möglich sind.

Bei der subtraktiven Farbmischung (Körperfarbe) können, weil andere Primärfarben benutzt werden, andere Farben als bei der additiven Farbmischung dargestellt werden. Die Farbräume von Geräten mit additiver und subtraktiver Farbmischung unterscheiden sich grundsätzlich. Beide beinhalten andererseits auch viele Farben, die sie gemeinsam darstellen können. Wegen dieser Gemeinsamkeiten ist eine Farbseparation überhaupt erst möglich.

Problematisch wird es, wenn die farbgebenden Methoden nicht mehr unter Normbedingungen betrachtet werden. Die subtraktive Farbmischung „lebt“ von reflektiertem Licht, während die additive Farbmischung selbstleuchtende Farben benutzt. Beide reagieren also anders auf die Änderung des Umgebungslichtes - hier kann auch das beste Farbmanagement (noch) nichts ausrichten.

Ein häufiger Praxisfall für Farbseparation ist die Umrechnung von RGB-Daten (additiv, etwa vom Bildschirm) in das CMYK-System für den Druck (subtraktiv). Der Übergang von einer additiven zu einer subtraktiven Mischung erfolgt über eine einfache Transformation der Farbräume von Gerät zu Gerät, da das nichtlineare Mischverhalten der Druckpigmente ebenso wie die Farbe des Papiers (möglicherweise mit einem Farbstich) berücksichtigt werden müssen. Da Farbabdeckung beim Druck nicht linear ist wird die Farbraumumrechnung beträchtlich erschwert. Hierfür sind besondere Farbräume (ICC) oder für diesen Zweck erstellte LUT (look-up table) nötig.



Ein weiteres Problem dieser Umrechnung ist die Verwendung unterschiedlicher Farbmengen, drei oder vier Farben, oder mehr wie beim Einsatz von Schmuckfarben.

Schwarz wird zusätzlich im Druck meist aus folgenden Gründen eingesetzt:

- Soll auf subtraktiv mit einer farbgebenden Methode *Schwarz* oder dunkelgrau dargestellt werden, ist es wirtschaftlicher, *Schwarz* als gesonderte Farbe zu benutzen. Die Darstellung von Schwarz aus nur drei Farben ist auf Grund der tatsächlichen Absorption der Farbpigmente sehr aufwendig, teuer, teilweise unmöglich und wird daher (fast) nur bei der Farbfotografie benutzt.
- Der subtraktiven Farbmischung fehlt der hohe Kontrastumfang, die der additiven Mischung eigen ist. Die Zugabe von Schwarz verbessert den subjektiven Kontrasteindruck (der Drucker spricht von Tiefe).
- Da Druckverfahren rasterorientierte Verfahren sind, entstehen bei der Darstellung zarter Farben starke subjektive Schärfeverluste. Die Rasterweite vergrößert sich, dadurch enthält das Bilddetail weniger Informationen, das wird vom Auge als Schärfeverlust interpretiert. Durch die Zumischung von *Schwarz* entsteht ein subjektiver Ausgleich dieses Verlustes. Demgegenüber können zu druckende Grauwerte aus dem gleichen Grund oft besser aus zusammengesetzten Farben statt aus schwarz erzeugt werden.

Bedingt durch Probleme wie nichtlineares Farbverhalten, Farbmengenunterschiede, Luminanzverlust, subjektiver Schärfenausgleich ist eine Farbseparation sehr aufwändig.

Bei der Fotoreproduktion ist die Ausbelichtung im klaren Vorteil, da sie das gleiche Farbmodell (nämlich RGB) wie die Eingabegeräte (Scanner, Fotoapparat) und das Kontrollgerät (Bildschirm) benutzt. Lediglich für das fertige Foto (farbgebende Methode) muss die additive in die subtraktive Farbmischung übertragen werden.

Farbabstände und Gleichabständigkeit

Es existieren keine Geräte, die den kompletten Farbumfang der menschlichen Wahrnehmung erfassen oder erzeugen können. MacAdam arbeitete an einer Farbmatrik, die die Gleichabständigkeit von Farbabständen ermöglichen sollte, die Farbabstände sollen als visuell gleich empfunden werden. Eine solche Farbmatrik hat zur Folge, dass die Parameter für die Farbabstände von der Lage im Farbarten- oder Chromatizitätsdiagramm abhängig sind.

Die menschliche Wahrnehmung von Farbabständen in technisch definierten Farbräumen darzustellen ergibt im CIE-Farbraum Toleranzellipsen gleicher Farbwahrnehmung, bekannt als MacAdam-Ellipsen. Hier ist der Ansatzpunkt für die Weiterentwicklung der höheren Farbmatrik. Weiterführende Arbeiten auf diesem Gebiet wurden von Walter S. Stiles und D. Farnsworth geleistet. Stiles entwickelte ein Linienelement, das gleichabständig wahrgenommene Farbabstände auch mathematisch gleichabständig (mit dem gleichen Abstand) beschreibt. Farnsworth entwickelte eine nichtlineare Transformation, die alle MacAdams-Ellipsen zu Kreisen verformt. Von der CIE wurde als Lösung zunächst der UCS-Farbraum in mehreren Versionen geschaffen. Später (1976) wurden sowohl der Lab-Farbraum (für Körperfarben bevorzugt) als auch der LUV-Farbraum (für Lichtfarben bevorzugt) als gleichabständige Farbräume präsentiert.

Geschichtlicher Abriss

Obwohl bereits Leonardo da Vinci Versuche unternommen hatte, Farben künstlerisch zu ordnen, blieben die Versuche wegen der fehlenden theoretischen Grundlagen in Ansätzen stecken. Noch um 1800, zu Zeiten von Goethes Interesse für die Farblehre, waren die Vorstellungen zu Farben sehr subjektiv orientiert. Das Ziel war noch vorwiegend, Malern die Beziehungen zwischen Farben zu erleichtern. Beispielhaft sei Runges Farbkugel^[1] genannt.

Um 1900 erforderte die fortschreitende Industrialisierung numerische Farbangaben, auch ohne momentan vorhandene Farbvorlage soll die Festlegung eines Designs möglich werden. Diesem Ziel Ordnung in die Vielfalt der Farbtönen zu bringen dienten die Arbeiten von Munsell, Ostwald, Rösch, Schrödinger voraus. Wichtige physikalische Grundlagen stammen von Maxwell, Young, Hering. Messungen zum Farbreiz wurden 1928 von Wright und Guild ausgeführt.

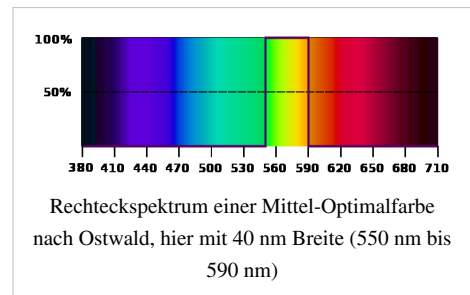
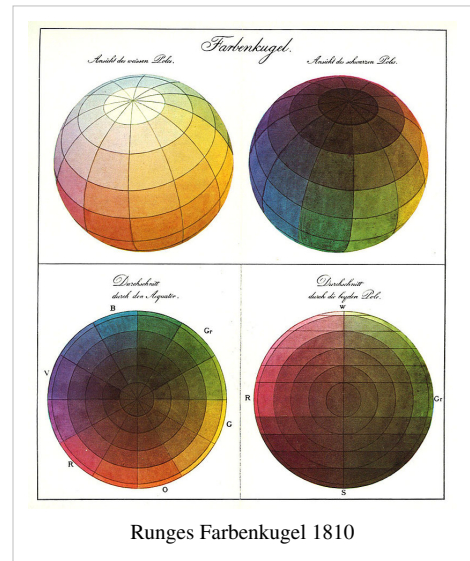
Im Ergebnis dieser Arbeiten war die erste Normung eines Farbraumes durch die IBK möglich geworden. Ausarbeitungen der CIE sind Empfehlungen, die weltweit durch die speziellen Gremien der Geräteklassen Abstimmung ermöglichen.

Das erste Farbmodell wurde 1931 von der CIE mit dem Tristimulus-Modell vorgeschlagen. Dieses Modell beruhte auf dem gemittelten 2°-Normalbeobachter (aus einer Gruppe von 17 Versuchspersonen). Dieses 2°-Gesichtsfeld entspricht der Größe der Netzhautregion mit der dichtesten Packung von Zapfen

(Farbrezeptoren) im menschlichen Auge, der Sehgrube (Fovea). Da die Probenflächen zur Abmusterung allerdings größer waren, wurde 1964 das Tristimulus-Modell für den 10°-Normalbeobachter eingeführt. Da die heutigen Dimensionen für farbige Kleinbildschirme, zum Beispiel für MP3-Player, portable Spielekonsolen und Handys sehr gering ausfallen, gewinnt der 2°-Normalbeobachter von 1931 für kleine Betrachtungswinkel wieder an Bedeutung. Bereits in den 1940er Jahren stellte MacAdam ein Problem in der xy-Fläche fest: die perzeptive Ungleichmäßigkeit im XYZ-Modell (auch als (Schuh)sole bezeichnet), führte dazu, dass die xy-Fläche durch die Transformation ins UCS-System (Uniform Chromaticity Scale, Yuv und Yu'v') so verformt wurde, dass die Farbabstände dem Ideal der perzeptiven Gleichförmigkeit (Gleichheit von Farbabständen im Farbraum und empfundenen Farbabständen) stark angenähert wurden. In der ursprünglichen xy-Ebene schwankt die Größe der Toleranzellipsen in Etwa um den Faktor 20, mit den kleinsten Ellipsen im blauen Bereich und den größten Ellipsen im grünen Bereich des Diagramms. Im UCS-System von 1976 wurde diese Ungleichförmigkeit stark vermindert. Die Größe der Toleranzellipsen im CIE 1976 UCS-Diagramm (u'v'-Diagramm), schwankt ungefähr nur noch um einen Faktor 4.^[2] Dies ist laut MacAdam der beste Wert, der durch Transformationen dieser Art erreicht werden kann.^[3]

Die Farbarten-Fläche eliminiert die dritte Achse des Hellbezugswertes A, der mit dem Tristimuluswert Y gleichgesetzt ist. Der Hellbezugswert wird auch mit L (Luminance) bezeichnet.

1976 wurden dann von der CIE sowohl das $L^*a^*b^*$ - als auch das $L^*u^*v^*$ -Modell verabschiedet. In beiden Systemen wird die Angleichung der Farbabstände im Farbraum an die Wahrnehmung erreicht, indem beide Systeme für L^* einen Term verwenden, der die dritte Wurzel des Quotienten aus dem Tristimuluswert Y und dem Weißpunkt Y_n beinhaltet. Dieser Term dient dazu, die logarithmische Helligkeitswahrnehmung des menschlichen Sehapparates nachzuahmen. Diese Nichtlinearität fließt zusätzlich in die Werte a^* und b^* bzw. u^* und v^* ein. Die nichtlineare Transformation ist umkehrbar. Das $L^*a^*b^*$ -Modell gilt bevorzugt für Körperfarben und kann statt in kartesischen



Koordinaten auch in Polarkoordinaten (genauer Zylinderkoordinaten), in Gestalt des $L^*C^*h^\circ$ -Systems, dargestellt werden. Die zylindrische Darstellungsform ergibt die zusätzlichen Koordinaten C^* (chroma) und den Farbtonwinkel h° (hue). Für Lichtfarben ist das $L^*u^*v^*$ -System besser geeignet, da dieses ein zugeordnetes Farbartendiagramm besitzt. $L^*u^*v^*$ kann ebenfalls in Zylinderkoordinaten überführt werden, mit den zusätzlichen Parametern C^* (chroma), h_{uv} (hue). Ein dritter Parameter, s_{uv} (psychometric saturation), kann, im Gegensatz zum $L^*C^*h^\circ$ -System, ebenfalls abgeleitet werden.

Die Entwicklung und Normierung der fotografischen und elektronischen Geräte brachte eine Anzahl von speziell ausgewählten RGB-Farbräumen (sRGB, Adobe RGB 1998), die an die eingesetzten Leuchtstoffe (Phosphore) für Rot, Grün und Blau und an realisierbare Filter (TFT-Bildschirme) angepasst wurden. Das Ziel ist es, den damit darstellbaren Farbreizen gerecht zu werden. In Darstellungen auf dem Chromazitätsdiagramm (xy-Fläche der CIE) sind RGB-Systeme Farbflächen innerhalb der durch die Phosphore (stoffliche Realisierungen der durch Elektronen angeregten Strahlung im erforderlichen Spektralbereich). Da die xy-Fläche (Schuhsohle, Hufeisen en: horseshoe) definitionsgemäß die maximal wahrnehmbaren Farben festlegt, müssen die RGB-Farbarten innerhalb des Spektralfarbenzuges liegen.

Mit dem Fortschritt der mathematischen Topologie, andererseits den steigenden Anforderungen der Reproduzierbarkeit des Farbeindrucks in der elektronischen Aufnahme- und Wiedergabetechnik werden weitere Anpassungen an die Realität notwendig sein. Anschaulich wird dieser Trend an den Farbabstandsformeln (ΔE), die das Maß im Farbraum festlegen und 1976, 1994 und 2000 modifiziert wurden.^[4] Einen ähnlichen Trend stellen die ICC-Profile dar, mit diesen werden anwendungsorientierte, auch geräteorientierte Arbeitsfarbräume gebildet. Im Colormanagement ist es möglich für die Anpassung der Farbwiedergabe/-umsetzung mit unterschiedlichen Gerätekategorien die speziellen Farbräume der Geräte zu bestimmen. Durch Matrizenrechnung oder LUT (Look-Up-Tabellen) wird der Farbort aus dem speziellen Arbeitsraum des Ausgangsgerätes in einen geeigneten (möglichst) umfassenden Farbraum als Zwischenergebnis transformiert um aus diesem „Zwischenraum“ (Vermittlungsfarbraum) wiederum den Farbort im Arbeitsfarbraum des Zielgerätes zu bestimmen.

Entwicklungen

30 bis 40 Farbmodelle wurden bislang erstellt. Diese unterscheiden sich durch den beabsichtigten Einsatzbereich. Entsprechend lassen sie sich kategorisieren.

- Technisch-physikalische Modelle, die den Farbreiz aus realen oder idealisierten farbgebenden Stoffen erzeugen, wie
 - RGB
 - CMY
 - CMYK.
- Wahrnehmungsorientierte Modelle, die Farben durch die Merkmale Helligkeit, Sättigung und Farbton beschreiben, wie HSV, HSL.
- Spezielle Modelle für die Farbdarstellung von selbstleuchtenden Geräten, wie
 - Röhrenmonitor, Farbfernsehbildröhre
 - Flüssigkristallbildschirme
 - Plasmabildschirme
 - PAL-TV
 - NTSC-TV

Farbabstandsformeln

Farbabstände können mit Farbabstandsformeln quantitativ bestimmt werden. Das Ergebnis solch einer Formel, ΔE , gilt als recht zuverlässiger Indikator für wahrgenommene Farbabstände. Die seit Einführung des Lab-Farbraums 1976 geänderte Farbabstandsformel ΔE 1976 und die Entwicklung ihrer Nachfolger verdeutlicht, dass es sich dabei keineswegs um ein triviales Problem handelt. ΔE 1976 wurde aus dem euklidischen Abstandsmaß zwischen den Farborten ermittelt. Diese einfache Berechnung wurde erheblich weiterentwickelt und erweitert zu CIE94 (ΔE 1994), und 1995 veröffentlicht. CIE94 wurde im Jahr 2000 nochmals erweitert zu CIEDE2000 (ΔE 2000). CIEDE2000 ist streng genommen ein Hybridmodell, da nicht nur die Farbabstandsformeln geändert wurden, sondern auch eine einfache Transformation des LAB-Farbraumes der eigentlichen Farbabstandsberechnung vorausgeht. Der Weg der Farbraumanpassung wurde im DIN99-Farbraum vollständig umgesetzt. Die Farbabstandsformel ΔE_{99} bleibt unberührt und ist im Aufbau mit dem ursprünglichen ΔE 1976 identisch. Eine weitere gebräuchliche Farbabstandsformel ist ΔE CMC(l:c), entwickelt vom *Colour Measurement Committee of the Society of Dyers and Colourists of Great Britain* (Farbmessungskomitee der Gesellschaft der Färber und Koloristen Großbritanniens), die 1984 veröffentlicht wurde.

Bei der Weiterentwicklung wurden auch früh zweckgebundene Faktoren eingeführt. Besonders für die Textilindustrie (ΔE CMC(l:c)) wurden spezielle Korrekturfaktoren in die Berechnungen des Farbabstandes eingeführt. Diese Faktoren können auch für die Farbabstandsbestimmung bei grafischen Anwendungen angepasst werden.

Variation der Farbräume

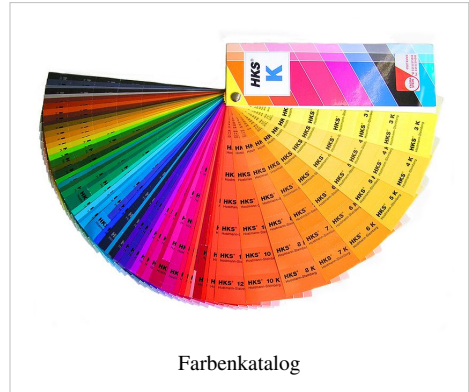
Eine Sonderstellung nimmt der DIN99-Farbraum ein. Er wurde erstmals 1999 als Farbraum nach DIN 6176 veröffentlicht und später zur DIN 6176:2001-03 weiterentwickelt. Anstelle einer Anpassung der Farbabstandsformeln wurde eine komplette Transformation des CIELAB-Farbraumes vorgenommen. Damit lassen sich Farbabstände als euklidische Abstände nach dem gleichen Prinzip wie ΔE des CIELAB-Farbraums bestimmen.

Wirtschaftliche Bedeutung des Farbabstandes

Der Farbabstand ist für Vertragsgestaltungen (Welche Farbe muss „Ferrari-roter“ Autolack haben?) und auch für die Farbzeptierung von Interesse. Besonders bei Farben mit hohem Wiedererkennungswert, wie bei vielen Marken als Corporate Identity üblich, ist eine durchgängig einwandfreie Farb(re)produktion und -wiedergabe sehr wichtig. Im Bereich des Verkehrswesens sind Farben für Lichtsignale wie Ampeln genau vorgeschrieben. Sie müssen dementsprechend farbgenau vom Hersteller geliefert werden. Bei „weiß-grauen“ (nahezu unbunten) Farben besteht zusätzlich das Problem, dass selbst kleinste Abweichungen zu deutlich wahrnehmbaren Farbstichen (Farben von Hose und Jackett „beißen“ sich) führen können, was in vielen Bereichen, etwa beim Nachkauf von Wandfarben, bei Schnittteilen von Kleidung oder bei Autolacken nicht akzeptabel ist. Wirtschaftlich entstehen schwerwiegende Konsequenzen für den Hersteller oder Lieferanten.

Farbmuster und Farbkatalog

Die Darstellung von Farbräumen wird oft durch abstrakte topografische Beschreibungen realisiert. Eine Alternative dazu bilden Farbmuster in einem **Farbenkatalog**. Allerdings werden technisch bedingt nur ausgewählte Farben präsentiert. Für alle Farben eines Farbraumes, also den kontinuierlichen Übergang aller Farborte ist dies für Lichtarten denkbar, aber praktisch nicht möglich.



Farbenkatalog

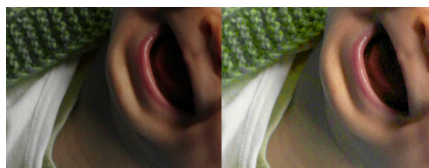
Varianten der Farbraumgestalt

Ein *Farbraum* beschreibt die Farben, die von einem Eingabegerät (Sehsinn, Fotoapparat, Scanner) oder einem Ausgabegerät (Bildschirm, Ausbelichter, Drucker, Projektor) unter spezifischen Bedingungen erkannt respektive dargestellt werden können. Wie jeder Mensch individuell Farben wahrnimmt, haben auch Geräte, zumindest Geräteklassen, unterschiedliche Farbräume, in denen sie Farben registrieren oder darstellen. Eine solche Individualität ist durch Produktionsschwankungen und Konstruktionsunterschiede bedingt.

Weitere Abweichungen entstehen durch optische Effekte, die bei der messtechnischen Erfassung von Farbräumen *nicht* berücksichtigt werden:

- Eingabegeräte (Sehsinn, Fotoapparat, Scanner) verändern in starkem Maße ihre Farbsensibilität bei wesentlichen Helligkeitsunterschieden. Da dieser Fall in der Praxis eher die Regel als die Ausnahme darstellt, kann ein unter Normbedingungen erstellter Farbraum nur eine Orientierungshilfe darstellen.
- Ausgabegeräte (Bildschirm, Ausbelichter, Drucker, Projektor) arbeiten unter bestimmten Lichtverhältnissen. Je nach Farbtemperatur des Umgebungslichts werden die Farben vom Auge verschieden wahrgenommen. Nur ein Ausgabegerät, das unter Normlichtbedingungen benutzt wird, liefert Ergebnisse, die dem vorher ermittelten Farbraum nahe kommen.

Ein großer Teil dieser Unterschiede wird durch automatische Bildoptimierungen korrigiert. Dabei werden metamere Effekte ausgenutzt, die - vereinfacht erklärt - Farben simulieren. Diese Farbsimulation ist technisch hochentwickelt und fester Bestandteil im Alltag. Ein typisches Beispiel sind Tintenstrahldrucker, die durch einen hohen Schwarz-Anteil die Mängel bei der Darstellung von Farben kaschieren.



Rechts ist ein Ausdruck ohne zusätzlichen Schwarzanteil zu sehen. Die Farbmängel sind deutlich zu erkennen. Der hohe Schwarzanteil des linken Bildes wird oft als angenehm empfunden, da er gleichzeitig einen hohen Schärfeeindruck simuliert.

Einige Farbräume und Farbmodelle

In vielen Anwendungsbereichen spielen spezialisierte Modelle und deren Räume eine Rolle:

- LMS-Farbraum - der physiologische Farbraum der auf den spektralen Empfindlichkeiten der L-, M-, S-Zapfen aufbaut.
- XYZ-Farbraum - der von der CIE ursprünglich aufgestellte Normfarbraum, der auf rechnerischen Koordinaten X, Y, Z konstruiert, die aus Zapfenempfindlichkeiten erstellt sind.
- RGB-Farbraum – Computermonitore, Internetstandard
- CMYK-Farbmodell – Desktoppublishing, Druck-Endstufe
- HSV-Farbraum mit den Varianten HSL, HSB, HSI – Design, Dokumentation von Malerei, Videokunst
- Lab-Farbraum – CIE-Farbenraum aus XYZ abgeleitet, der ebenfalls alle wahrnehmbaren Farben umfasst; und dessen Weiterentwicklung DIN99-Farbraum
- LCh°-Farbraum bezeichnet keinen weiteren Farbraum im eigentlichen Sinne, sondern die Darstellung von HSV, LUV oder LAB in Polarkoordinaten
- I1I2I3-Farbraum – rechentechnisch optimierter Raum der Bildverarbeitung
- YCbCr-Farbmodell (manchmal kurz YCC genannt, vgl. unten) – digitales Fernsehen, sowohl digitales PAL als auch digitales NTSC, DVB, JPEG, MPEG, DVD-Video.
- xvYCC - gegenüber YCbCr erweiterter Farbraum, der die gesamten 8 Bit pro Farbkanal nutzt und für neue Flachbildschirme verwendet werden kann.
- YPbPr-Farbmodell – analoges HDTV, analoges Component Video
- YUV-Farbmodell – für analoges PAL und NTSC
- YIQ-Farbmodell – veraltet, früher verwendet bei analogem NTSC
- YDbDr-Farbmodell - für analoges SECAM
- YCC-Farbmodell - Kodak Photo CD

Farbwerte bei der Darstellung von Internetseiten

Die Angabe der Farbwerte in den Cascading Style Sheets sind ein anschauliches Beispiel für ein dreidimensionales Farbmodell^[5]. Definiert sind die Werte im System eines RGB-Farbmodells mit Rot, Grün und Blau. Der Anwendungsfarbraum bei Röhrenmonitoren ist der Farbraum des Bildschirms mit den typischen Leuchtstoffen, die bei Elektronenanregung in Rot, Grün und Blau phosphoreszieren. Der zugrunde liegende Standard ist sRGB, der als Primärvalenzen die im ITU-R BT.709-5-Standard festgelegten Farbkoordinaten verwendet.

CSS eines Paares komplementärer Farben und die daraus folgende fargebende Wirkung

<code>background-color:rgb(255,0,151)</code>
<code>background-color:rgb(0,255,104)</code>

Im „CSS(-rgb)-Modell“ werden für den Hintergrund (background) des Feldes der Website Werte zwischen 0 und 255 definiert (also in 2^8 Stufen). Im Beispiel steht

- ein „Purpur“ mit folgenden Farbwerten
 - $r = 255$ für die ideale Basisfarbe Rot in voller Reinheit und Stärke,
 - $g = 0$ entsprechend für fehlende Basisfarbe Grün,
 - $b = 151$ legt fest, dass die Basisfarbe Blau zu $151/256$ anteiliger Stärke beteiligt sein soll.
- ein „Grün“ mit folgenden Farbwerten, die (rgb-)Komplementärfarbe
 - $r = 0$ fehlende Basisfarbe Rot,
 - $g = 255$ Basisfarbe Grün in voller Stärke und Intensität,
 - $b = 104$ komplementäre Basisfarbe Blau in $104/256$ anteiliger Stärke ($104 + 151 = 255$)

Durch die verwendete Software des PCs werden die Farbwerte der CSS-Stylesheets umgerechnet. Die drei Bildschirmleuchtstoffe für Rot, Grün und Blau werden in der Strahlintensität angesteuert. In ausreichendem Abstand vom Bildschirm führt dieser Farbreiz beim Nutzer zu einer Farbvalenz in seinem „individuellen Zapfenfarbraum“. So entsteht beim Betrachten der Website der angestrebte Farbeindruck. Der Zapfenfarbraum des Betrachters („Jener“ der „jetzt“ „diesen“ Bildschirm ansieht.) ist ein LMS-Farbraum des Betrachters „Individuums“.

Farbsystem für Bildschirme

Beim Mischen dreier Primärfarben (RGB-System) können Farben mit herkömmlichen Darstellungsgeräten, wie Röhren- und LC-Bildschirmen, nur im Rahmen der Emissionsquellen oder durch absorbierende Färbemittel (Filter) erzeugt werden. Farbsysteme mit wellenlängengleicher Farbe und Helligkeit (HSV) sind besser dafür geeignet, die reinen Farben zu bezeichnen; die technische Interpretation ist aber schwieriger. Die Sonderstellung der Purpur-/Magentafarben wird im hufeisenförmigen CIE_{xy}- oder CIE_{uv}-Farbdiagramm durch die abschließende Gerade, die den äußersten Blauwert mit dem äußersten Rotwert verbindet, erkennbar.

Die CIE-Systeme

- Tristimulusraum von 1931 (2°-Normalbeobachter, engl.: 2° standard observer), 1964 mit neuen Datensätzen für ein Sichtfeld von 10° ergänzt (10°-Normalbeobachter, engl.: 10° supplementary standard observer)
- CIE XYZ-Farbraumsystem (Chromatizitäts-Diagramm)
 - Normfarbtafel
 - da die Spektralwertfunktion $y(\lambda)$ genau der Helligkeitsempfindlichkeit beim Zapfensehen entspricht, kann die (nicht normalisierte) Koordinate Y als Helligkeitswert (Luminanz) verwendet werden, hier sollte als Konstante besser „A“, statt Y gewählt werden
 - *Koordinaten:* Y, x, y oder in der Normfarbtafel nur x, y
- CIEYUV-Farbraumsystem, auch CIE UCS, 1960 vorgeschlagen, (CIE 1960 UCS, *Uniform Chromaticity Scale*, de: *Einheitliche Farbskala*)
 - lineare Transformation von CIEXYZ, um die ortsabhängige Nichtlinearität der wahrgenommenen Farbabstände zu verringern
 - nur 2D-Farbabstände definiert
 - Trotz oft gleicher Schreibweise (YUV statt CIEYUV oder CIEYuv) nicht mit YUV aus der Videotechnik verwandt!
 - *Koordinaten:* Y, u, v
- YUV-Farbmodell, (CIE 1964 UCS), 1964 vorgeschlagen
 - lineare Transformation des CIEYUV (Yuv)-Farbraums
 - weiterer lineare Transformation, um die ortsabhängige Nichtlinearität der wahrgenommenen Farbabstände zu verringern
 - nur 2D-Farbabstände definiert
 - *Koordinaten:* Y, u', v'
- CIELUV- Farbraumsystem von 1976
 - nichtlineare Transformation des CIEXYZ-Farbraums, bezieht den CIE 1964 UCS-Farbraum (CIEYU'V') für den Weißpunkt ein, Transformation ist umkehrbar
 - Spektrallinie ist äußere Begrenzung des Farbdiagramms, daher ist die absolute Sättigung (relativ zur Spektrallinie) einer Farbe messbar
 - Farbmischungen liegen auf Geraden im Raum, daher sehr gut für farbmimetrische Berechnungen und Darstellung additiver Farbmischung geeignet, wie zur Beschreibung selbstleuchtender Quellen (Lichtfarben)
 - Farbdiagramm psychometrisch orientiert und orientiert sich an der Gegenfarbtheorie, ähnlich wie CIELAB
 - Schwerpunkt Gleichabständigkeit der Farbwahrnehmung, vergleichbar mit dem LAB-Farbraum

- *Koordinaten:* L^*, u^*, v^*
- CIELAB-Farbraumsystem von 1976
 - nichtlineare Transformation von CIEXYZ, Transformation ist umkehrbar
 - Farbdigramm psychometrisch orientiert und basiert auf der Gegenfarbtheorie
 - im Gegensatz zu CIELUV ist in CIELAB die Messung der absoluten Sättigung (relativ zur Spektrallinie) nicht möglich, da die Spektrallinie im LAB-Farbraum keine bevorzugte Lage besitzt und im Diagramm statt der Sättigung die Buntheit einer Farbe dargestellt wird
 - keine Farbtafel vorhanden
 - gute Gleichabständigkeit von Farbabständen durch die nichtlineare Transformation gewährleistet
 - besonders zur Beschreibung von nichtleuchtenden Farben (Körperfarben) verwendet
 - *Koordinaten:* L^*, a^*, b^*

Systeme außerhalb der CIE

- DIN99-Farbraum, (Farbraum nach DIN 6176), seit 1999
 - *Koordinaten:* L_{99}, a_{99}, b_{99}
 - Alternative zur Farbabstandsformel CIE94, vergleichbare Gleichabständigkeit
 - Durch spätere Weiterentwicklung (DIN 6176:2001-03) Gleichabständigkeit verbessert. Die derzeit beste Variante (DIN99d) liegt qualitativ zwischen CIE94 und CIEDE2000
 - Sonderstellung gegenüber allen CIELAB-Nachfolgern, statt der Farbabstandsformeln wird der *gesamte Farbraum* transformiert
 - Anpassung von L^* , dunkle Farben stärker gewichtet, helle komprimiert
 - „runde“ Gestalt (Gleichabständigkeits-Idealform) durch radiale Kompression der Bunttonebene, dadurch:
 - Farbabstände nahe der Unbuntachse werden durch die radiale Kompression gesättigter Farben stärker gewichtet (ähnlich CIEDE2000)
 - Berechnung einfacher als CIE94 und CIEDE2000, ΔE_{99} wird wie ΔE berechnet, da der Farbraum transformiert wird und die Farbabstandsformeln unberührt bleiben
 - Im Falle der Variante DIN99d findet ein Teil der Transformation schon im XYZ-Farbraum statt

Farbkomponenten

Farbkomponenten, die für die CIE Farbraumsysteme essenziell sind:

- CIE XYZ oder Tristimulus-Werte

Color/Image Appearance Models (CAM/IAM)

Derzeit werden intensiv Untersuchungen und Forschungen im Bereich der „Color Appearance Models“ (**CAM**), zu Deutsch etwa: *Modelle zur Erscheinung von Farbe*, und „Image Appearance Models“ (**IAM**), zu Deutsch: *Modelle zur Erscheinung von Bildern*, betrieben. Da die mathematischen Beschreibungen, die nur Farben und Farbabstände berechnen, höhere Ebenen der menschlichen Farbwahrnehmung nicht berücksichtigen, sind fortgeschrittenere Modelle gefragt, da eine Vielzahl von anderen Faktoren starke Einflüsse auf den Gesamteindruck haben können. Die Entwicklungen von CAM und IAM entspringen der Fragestellung: „Wie *erscheint* eine bestimmte Farbe oder ein Bild im allgemeinen Kontext der näheren und fernerer Umgebung eines Bildes?“ Phänomene, wie etwa Simultankontrast, Adaptation an die Umgebungshelligkeit und deren zeitlichen Verlauf, Verringerung der räumlichen Auflösung beim Dämmerungs- (mesopisches Sehen) und Dunkelsehen (skotopisches Sehen) spielen nämlich eine große Rolle bei der Farbwahrnehmung.

Ein sehr alltägliches Problem in diesem Zusammenhang ist der grundlegende Widerspruch zwischen Schärfe und Schärfeempfinden. IAM sind ein Schritt in Richtung einer Lösung dieses Konflikts, da die Verarbeitung von

Detaillkontrasten, Farbkontrasten usw. in diesen Modellen gesondert berücksichtigt wird.

CIELAB

ist im Grunde genommen das erste CAM. Es wird schon die Adaption an den Weißpunkt berücksichtigt (Mittels Transformationsmatrizen, wie z. B. von-Kries- oder Bradford-Matrizen), außerdem die Kompression der Helligkeitswahrnehmung. Die Weiterentwicklung führte dann zu CIECAM97s.

CIECAM97s

ist genauer und umfangreicher, was die Betrachtungsbedingungen usw. angeht. Die Entwicklung wurde fortgesetzt zu CIECAM02.

CIECAM02

liefert allgemein genauere Werte für Farbabstände und berücksichtigt in größerem Umfang Dinge wie etwa Bildhelligkeit, Farbhintergrund, Bildumgebung, Weißpunkt, Adaptation und Simultankontrast.

iCAM

ist ein weiterer Schritt in der Entwicklung. Der neueste Vertreter dieser Modelle ist **iCAM06**. Es werden Dinge wie lokale Farbadaptation, lokale Helligkeit und Umgebungshelligkeit, HDR, und zeitlicher Verlauf der Adaptation an die Umgebungshelligkeit berücksichtigt. Der Bereich der IAM wird betreten. iCAM06 ist im Gegensatz zu seinen Vorgängern schon ein ausgewachsenes IAM, da beispielsweise die Weißpunktadaptation und Kontrastberechnungen nicht mehr mit einem rein lokalen Modell (Pixel für Pixel) sondern räumlich berechnet werden. Somit können Bildbereiche je nach Struktur und Bildkomposition auch fernere Bereiche beeinflussen und somit den Gesamteindruck eines Bildes ändern.

Weblinks

- Farbkugel nach Runge (interaktives 3D Java-Applet) ^[6]
- Farbsysteme in Kunst und Wissenschaft (Virtuelles Farbmuseum) ^[7]
- Poynton's Color FAQ (englisch) ^[8]
- zu YCC und weiteren Modellen ^[9]
- Internetseite der CIE (englisch) ^[10]
- Farbtafeln und Entwicklung der CAM und IAM (PDF, en: 2,85 MB) ^[11]
- *Meet iCAM: A Next-Generation Color Appearance Model* (PDF, en: 343 kB) ^[12]
- *The CIE 1997 Interim Colour Appearance Model (Simple Version)*, *CIECAM97s* (PDF, en: 63 kB) ^[13]
- *Color Appearance Models: CIECAM02 and Beyond Outline* (PDF, en: 2,33 MB) ^[14]

Einzelnachweise

- [1] Farbkugel nach Runge (<http://www.colors-system.com/projekte/Grafik/15run/02run.htm>)
- [2] R.W.G. Hunt: Measuring Colour, Kap. 3.6 - Uniform Chromaticity Diagrams
- [3] MacAdam: Color Measurement 2. ed. Springer-Verlag, Kap. 8.3 - Nonlinear Transformations of the Chromaticity Diagram
- [4] <http://www.brucelindbloom.com/Navigation: Math>
- [5] CSS bei W3C (<http://www.w3.org/Style/CSS/>)
- [6] <http://egc-wow.de/farbkugel/>
- [7] <http://www.colors-system.com/>
- [8] <http://www.poynton.com/ColorFAQ.html>
- [9] http://local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/texture_colour/ycc/
- [10] http://www.cie.co.at/index_ie.html
- [11] <http://www.cis.rit.edu/fairchild/PDFs/PRES11.pdf>
- [12] <http://www.cis.rit.edu/fairchild/PDFs/PRO14.pdf>
- [13] http://www.cis.rit.edu/fairchild/PDFs/CIECAM97s_TC_Draft.pdf
- [14] <http://www.cis.rit.edu/fairchild/PDFs/AppearanceLec.pdf>

Farbreiz

Farbreiz ist die physikalische Strahlung des sichtbaren Lichts, die durch unmittelbare Reizung der Netzhaut des Auges eine Farbempfindung hervorruft.

Der Farbreiz kann sowohl von einer Primärlichtquelle als auch von der Oberfläche oder der Tiefe eines beleuchteten Körpers ausgehen.

Für den Farbreiz ist die relative spektrale Strahlungsverteilung S_λ entscheidend, es ist die „reizende“ Strahlung in ihrer Abhängigkeit von der Wellenlänge und nicht in ihrer absoluten Größe. Die spektrale Verteilung, welche die Farbempfindung wesentlich bestimmt, wird als Farbreizfunktion $\varphi(\lambda)$ bezeichnet. Diese Funktion ist im Falle eines Selbststrahlers gleich dessen spektraler Verteilung $S(\lambda)$.

Im Falle einer Sekundärlichtquelle, also einer Körperfarbe, wird der Farbreiz vom Produkt aus Strahldichtefaktor $\beta(\lambda)$ und der spektralen Verteilung der Lichtquelle.

Körperfarben ändern die spektrale Zusammensetzung entsprechend ihres Transmissions- und Remissionsverhaltens. Aus praktischen Gründen unterscheidet man Durchsichtsfarben (farbige Lösungen, Farbfilter) von Aufsichtsfarben (Anstrich, Textilfärbung). Bei Durchsichtsfarben beeinflusst der Körper den Farbreiz im Volumen angegebenen den spektralen Transmissionsgrad τ_λ . Bei Aufsichtsfarben wird der Farbreiz von der Oberfläche beeinflusst, beschrieben durch den spektralen Remissionsgrad β_λ .

Begriff	Wirkort	Wirkart	Fachgebiet
Farbreiz	Lichtquelle	Sichtbares Licht	Physik / Optik
Farbvalenz	Auge, insbesondere Zapfen	Wahrnehmung	Physiologie
Farbe/Farbempfindung	Gehirn	Erleben und Psyche	Psychologie

↳ Der Zusammenhang der Begriffe der Farbe/ Farbmetrik

Literatur

- Manfred Richter: *Einführung in die Farbmetrik*. Walter de Gruyter, Berlin 1981

Weblinks

- Ein Farbmach-Experiment ^[1]

Farbstoff

Als **Farbstoff** werden chemische Verbindungen bezeichnet, die die Eigenschaft haben, andere Materialien zu färben. Sammelbezeichnung für alle farbgebenden Stoffe gemäß DIN 55934 dagegen ist der Begriff *Farbmittel*, wobei *Farbstoffe* als solche nun nur diejenigen Farbmittel sind, die auch in ihren Anwendungsmedien löslich sind, während die übrigen, unlöslichen Farbmittel als *Pigmente* bezeichnet werden.

Farbstoffe im obigen Sinn werden vorwiegend zum Färben von Textilien, Papier und Leder verwendet, während bei der Einfärbung von Kunststoffen und Lacken die Benutzung von Pigmenten überwiegt. Darüber hinaus gibt es funktionelle Farbstoffe für spezielle Einsatzbereiche wie CDs, DVDs, Biomarker, LC-Displays usw. Eine besondere Abteilung unter den Farbstoffen schließlich bilden die zum Färben von Lebensmitteln dienenden Lebensmittelfarbstoffe, die deshalb auch besonderen Qualitätsanforderungen unterliegen und als Lebensmittelzusatzstoffe gelten.

Einteilung

- Naturfarbstoffe
 - Farbstoffe, die von Tieren produziert werden, zum Beispiel Purpur aus der Purpurschnecke und Karmin aus der Cochenille-Schildlaus
 - Farbstoffe, die von Pflanzen produziert werden, zum Beispiel Indigo, Chlorophyll, Crocetin aus Krokussen (Safran) oder Carotin aus der Karotte
- Synthetische Farbstoffe
 - Organische Farbstoffe: anfangs wegen des aus Steinkohlenteer gewonnenen Anilins auch Teerfarbstoffe genannt; die größte Gruppe sind die Azofarbstoffe.

Als Standardwerk der Farbstoffchemie gilt der Colour Index. Darin sind alle Farbstoffe nach Anwendung und nach ihrer Formel systematisch erfasst. Zusätzlich sind rekursiv Handelsprodukte dieser Colour-Index-Kennzeichnung zugeordnet und Eigenschaften für den Anwender und Herstellungshinweise erfasst.

Geschichte

Naturfarbstoffe

Über die Verwendung von Farbstoffen im Altertum gibt es weniger exakte Kenntnisse. Im Gegensatz zu Pigmenten werden Farbstoffe durch Einwirkung von Licht, Luft und Mikroorganismen zersetzt.^[1] Mittels HPLC lassen sich jedoch kleinste Spuren von Farbstoffen an sehr alten Textilien nachweisen.^[2] Indigo konnte auf ägyptischen Textilien, die über 3000 Jahre alt sind, nachgewiesen werden. In Bengalen wurden schon sehr zeitig große Indigoplantagen angelegt. Aufzeichnungen zur Färbetechnik mit Indigo machte der römische Ingenieur Vitruv etwa 30 v. Chr., er nannte den Farbstoff Indisch-Blau.^[1] Auch von den Ägyptern sind Aufzeichnungen zum Färbeprozess überliefert (Papyrus Leidensis, Papyrus Holmiensis). In Europa wurde dieser Farbstoff aus dem Färberwaid gewonnen. Im 17. Jahrhundert wurde diese Gewinnung unrentabel, da die Indigofera in englischen Plantagen die dreißigfache Menge an Indigo-Farbstoff lieferte.^[2]

Der teuerste Farbstoff aller Zeiten ist der echte Purpur. Er kann aus den Farbdrüsen der Purpurschnecke gewonnen werden, die an der Küste des östlichen Mittelmeeres vorkommt. Für ein Gramm des Farbstoffes werden rund 8000 Schnecken benötigt. Paul Friedländer (Chemiker) wies im Jahr 1910 nach, dass es sich bei dem Farbstoff um Dibromindigo handelte.^[2]

Da Purpur sehr teuer war, bediente man sich früher auch für Rotfärbungen des im Krapp enthaltenen Farbstoffes Alizarin.^[2] Dieses Farbmittel ist schon um Christi Geburt bekannt gewesen. Auch der rote Farbstoff Henna, der aus

getrockneten Blättern der Hennapflanze gewonnen wurde, hatte früher große Bedeutung. Weitere schon seit altersher verwendete Farbstoffe natürlichen Ursprungs waren Kermes, Kurkuma sowie Safran – letzterer diente schon bei den Babyloniern und Römern vor über 2000 Jahren als Färbemittel sowie zu Wandmalereien^[1].

Mit der Entdeckung der neuen Welt gelangten auch natürliche Farbstoffe des Holzes an Bedeutung. Zu diesen Farbhölzern gehörten Blauholz, Rotholz, Gelbholz. Diese Farbstoffe wurden (und werden) in der Textil- (Wolle, Seide, Polyamid) und Lederfärberei genutzt, ferner für Haar- und Papierfärbung.^[3]

Als natürliche Farbstoffe zur Färbung von Lebensmitteln sind Carotin, Chlorophyll, Anthocyane, Betanine zugelassen.^[4]

Synthetische Farbstoffe

Bei der Verkokung von Steinkohle fällt als Nebenprodukt Steinkohlenteer an, der früher als unbrauchbarer Abfall galt. In Oranienburg bei Berlin isolierte Friedlieb Ferdinand Runge aus Teer Substanzen wie Phenol und Anilin. August Wilhelm Hofmann entdeckte die Umwandlung von Nitrobenzol zu Anilin mit Zink und Salzsäure. Erst im Jahr 1865 gelang Kekulé von Stradonitz die Strukturaufklärung von Benzol. Diese Substanzen bildeten die Grundlage der Teerfarbenproduktion. Im Buch „Anilin“ von Karl Aloys Schenzinger wird diese historische Phase der Farbstoffchemie dargestellt.^[5]

August Wilhelm Hofmanns Schüler William Henry Perkin (Entdecker des Mauvein-Farbstoffs), Johann Peter Grieß (Entdecker der ersten Azofarbstoffe), Carl Alexander von Martius (Gründer der Agfa) bauten die Grundlagen der Farbstoffchemie auf, ein weiterer bedeutender Schüler war Georg Merck (Gründer von Merck).^[6] Hoffmann arbeitete mehrere Jahre in England. Im Jahr 1865 nahm er einen Lehrstuhl in Berlin an.

1834 wurde in Leverkusen eine Anilinschwarzfabrik gegründet. Farbstoffe aus Teer waren der ursprüngliche Geschäftszweig für die späteren Großunternehmen der Chemiebranche. Der Kaufmann Friedrich Bayer und der Färber Weskott gründeten 1863 eine offene Handelsgesellschaft für Farbstoffe.^[1] Aus dieser Gesellschaft ging die spätere Bayer AG hervor. Die Farbwerke Hoechst wurden ebenfalls 1863 gegründet. Auch die Badische Anilin- und Soda-Fabrik (BASF) in Ludwigshafen führte in ihrem Namen den Farbgrundstoff Anilin.

Mit der Entdeckung des Mauvein-Farbstoffs durch Perkin begann die synthetische Farbstoffentwicklung 1856.^[7] Ein Meilenstein der Entwicklung von Farbstoffen war die Diazotierung (1862) von Peter Grieß. Im Jahr 1863 fand C. A. Martius den ersten verkäuflichen Azofarbstoff, das Bismarckbraun. Etwa 70 % aller verkauften Farbstoffe bestanden lange Zeit aus solchen Azofarbstoffen.^[8] Die enge Zusammenarbeit zwischen Heinrich Caro (damaliger BASF-Chef) und den Berliner Chemikern Adolf von Baeyer, Carl Graebe und Carl Theodor Liebermann wirkte sich befruchtend auf die Entwicklung von ökonomisch gut verkäuflichen Farbstoffen (Textilfärbung) wie Alizarin und Indigo aus.

Der französische Chemiker François-Emmanuel Verguin entdeckte 1858 nahezu zeitgleich mit August Wilhelm von Hofmann den Triphenylmethan-Farbstoff Fuchsin. Ein weiterer Triphenylmethanfarbstoff wurde im Jahr 1877 synthetisiert: das Malachitgrün (von O. Fischer). Da er nicht patentgeschützt war, konnte Caro den Farbstoff schnell industriell herstellen. Zur Gruppe der Phthaleine – die ähnlich wie Triphenylmethanfarbstoffe konstituiert sind – gehört das Phenolphthalein. Im Jahr 1871 wurde es von Adolf von Baeyer^[9] entdeckt. Es wird aus Phthalsäureanhydrid und Resorcin hergestellt und dient auch als Farbindikator für pH-Änderungen.^[9]

Methylviolett wurde 1861 von Lauth entdeckt. Es gehört zur Gruppe der kationischen Farbstoffe und eignet sich für Druckfarben, Tinten und Durchschreibepapier.^[9]

Carl Graebe und Carl Theodor Liebermann entwickelten die Synthese des Alizarins. Sie stellten es aus 1,2-Dibromanthrachinon und Anthrachinon-2-sulfonsäure her und legten 1869 der Berliner Chemischen Gesellschaft einige Proben vor. Alizarin ist ein Farbstoff, der als Metallsalz vorliegt oder als Beizenfarbstoff eingesetzt wird.

Adolf von Baeyer entwickelte eine Synthese für den Indigo (1870). Indigo ist ein Küpenfarbstoff. Durch Luftoxidation wird dieser Farbstoff fest im Gewebe verankert. Erst durch Weiterentwicklungen von Karl Heumann

gab es jedoch im Jahr 1897 ein günstiges technisches Verfahren für die industrielle Darstellung. Zunächst kostete das Kilo synthetischer Indigo etwa 16 Mark, der natürliche Indigo etwa 18–20 Mark. Deutschland importierte damals noch 1036 Tonnen natürlichen Indigo. Schon bald stieg der Umsatz, der Preis sank. Im Jahr 1913 wurden schon 33.353 Tonnen exportiert, der Umsatz lag bei 8,3 Millionen Mark.^[9]

Im Jahr 1876 erhielt Heinrich Caro (BASF) das erste deutsche Farbstoffpatent, und zwar für Methylenblau – einen basischen Farbstoff.

Paul Böttger entwickelte im Jahr 1884 bei Bayer das Kongorot, einen Direktfarbstoff.

René Bohn fand bei der BASF 1901 die Farbstoffgruppe der Indanthrene (Indanthrenblau, RS). Der Name leitet sich aus Indigo und Anthracen ab. Dies sind hochechte Küpenfarbstoffe.

Im Jahr 1913 wurden von deutschen Farbstofffabriken etwa 80 % des weltweiten Chemiefarbstoffumsatzes erwirtschaftet.^[10] Nach dem Ersten Weltkrieg lag der Anteil bei etwas weniger als 50 %.

Wegen starker Konkurrenz und Überkapazitäten schlossen sich die Farbhersteller in Deutschland 1925 zu den I. G. Farben, bestehend aus BASF, Bayer, Farbwerke Hoechst, der AGFA, Griesheim-Elektron, zusammen. Auch in anderen Ländern schlossen sich Chemieunternehmen zusammen (England: Imperial Chemical Industries (ICI), USA: DuPont, Frankreich: Kuhlmann).^[11]

Das Kupferphthalocyanin kam im Jahr 1934 auf den Markt. Wegen seiner schweren Löslichkeit wurde es zunächst nur als Pigment genutzt.^[8]

Erst recht spät wurden die Reaktivfarbstoffe entwickelt. Diese bilden kovalente Bindungen zum Substrat aus. Erste Entwicklungen von ersten Reaktivfarbstoffen begannen mit Arbeiten von Cross und Bevan im Jahre 1895. Erst mit der Entwicklung der Vinylsulfonfarbstoffe (Remalane) im Jahr 1952 gab es industriell nutzbare Farbstoffe dieser Gruppe. Eine weitere wichtige Reaktivfarbstoffgruppe besitzt als *Ankergruppe* einen 1,3,5-Triazinrest (Procion und Cibacron- (jetzt Novacron-)Farbstoffe).^[12]

Ab 1923 wurden von der British Dyestuff Corp. Dispersionsfarbstoffe entwickelt.^[13] Diese Farbstoffe dienten zunächst dem Färben von Acetatseide. Später wurde diese Farbstoffklasse zum Färben von Polyesterfasern wichtig. Dispersionsfarbstoffe lösen sich leicht in organischen Lösungsmitteln und sind in Wasser kaum löslich.

Wirkungsweise

Licht ist für den Menschen im Bereich 380 bis 790 nm sichtbar. Dieser Wellenlängenbereich wird als *Lichtspektrum* bezeichnet.

Trifft weißes Licht auf einen Körper, wird der Lichtstrahl zumeist teilweise reflektiert und teilweise absorbiert. Werden kurzwellige Anteile absorbiert, so enthält die reflektierte Strahlung vorwiegend langwellige Anteile (bis 790 nm) und der Farbeindruck Rot wird wahrgenommen, bei vorwiegend kurzwelliger Absorption ab 380 nm aufwärts ist die Farbwahrnehmung Violett aus dem reflektierten Licht.

Farbstoffe absorbieren einen begrenzten Teil des sichtbaren weißen Lichtes und reflektieren den nicht absorbierten Teil des weißen Lichtes. Die Komplementärfarbe des wahrgenommenen Lichtes wird vom Farbstoff absorbiert. Die Farbabsorption basiert auf vielen konjugierten Doppelbindungen und aromatischen Grundkörpern. Bei der Absorption werden die konjugierten Elektronen im Doppelbindungssystem auf einen höheren Energiezustand gehoben und das Farbstoffmolekül gibt die Energie durch Strahlung in einer anderen Wellenlänge (oder durch Wärmeabstrahlung) wieder ab.^[14]

Durch die Änderung funktioneller Gruppen am Aromaten (Nitro-, Sulfonsäure-, Dimethylamino-, Hydroxygruppen) kann der Absorptionsbereich eines Farbstoffs beeinflusst werden, gleichzeitig können dadurch auch die chemische Reaktivität und die Färbeeigenschaft beeinflusst werden.

Für das Erkennen von Farben werden die Netzhaut, der Sehnerv und ein bestimmter Teil der Gehirnrinde (V4) benötigt. Fällt ein Teil der Gehirnregion V4 (durch einen Schlaganfall oder eine Krankheit) aus, sehen die

Betroffenen nur noch Grautöne (Achromatopsie).^[15] Das Farbempfinden für einzelne Wellenlängen ist individuell leicht unterschiedlich ausgeprägt und hängt auch von Beleuchtung und Blickwinkel ab. Die Commission Internationale de l'Éclairage (CIE-Normvalenzsystem) hat mit vielen Testpersonen spektrale Empfindlichkeiten für Wellenlängen abgeleitet.^[2]

Die Farbeigenschaften von Farbstoffen sind begründet

- im Molekülaufbau des Farbstoffs selbst,
- in seinen Molekül- und Atomschwingungen,
- in der Konzentration des Farbstoffs sowie
- im seinem Bindungszustand am oder im jeweiligen Medium.

Art und Weise der Bindung des Farbstoffs werden dabei vom Substrat (Textil, Papier, Kunststoff, Lack) mitbestimmt – die Bindung an einen Festkörper oder die Verteilung in Lösung können den Farbton ändern (vgl. Solvatochromie).

Die spektrale Verteilung des zurückgeworfenen Lichtes entspricht dem eingestrahlten Licht abzüglich der Absorptionen durch den Farbstoff. Wird der Farbreiz dieser verbliebenen (Rest-)Strahlung diskutiert, spricht man auch von *Körperfarben*, während der von einer selbst leuchtenden Lichtquelle kommende Farbreiz als *Lichtfarbe* bezeichnet wird.

Bei der Absorption von elektromagnetischer Strahlung wird das Energieniveau von Elektronen in Molekülen oder Atomen angehoben. Näherungsweise wird der Abstand zwischen Elektronen und den Atomkernen vergrößert. Die nötige Energie wird der einfallenden elektromagnetischen Strahlung, dem Licht, entnommen.

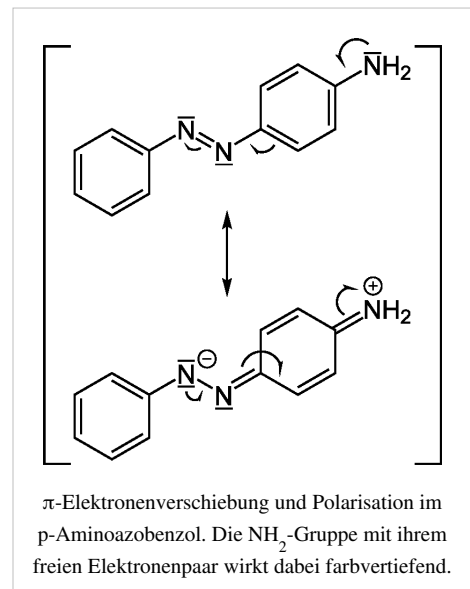
Da diese Vorgänge unter Quantenbedingungen ablaufen, ist diese Absorption nicht kontinuierlich, sondern erfolgt nur in bestimmten Sprüngen, die dem energetischen Unterschied zwischen den Elektronen vor und nach der Absorption entsprechen. Dieser Energieunterschied ist umgekehrt proportional zu der absorbierten Wellenlänge des einfallenden Lichts und bestimmt somit die Farbe, in der der Farbstoff erscheint.

Chemisch-physikalische Grundlagen

Die Eigenschaft einer Verbindung, ein „Farbstoff“ zu sein, ist in der chemischen Struktur des Materials begründet. Moleküle mit σ -Bindungen absorbieren elektromagnetische Energie im Röntgen- und UV-Bereich. Moleküle mit Elektronen in π -Bindungen (ungesättigte Bindungen) dagegen werden bereits bei geringerer Energie von elektromagnetischen Wellen (oder Photonen) angeregt. Wechselwirkungen dieser Art im langwelligen UV- und besonders im sichtbaren Bereich des Lichts lösen den Farbreiz aus.

Bei mehreren konjugiert ungesättigten Bindungen im Molekül lassen sich die π -Elektronen „verschmieren“ (delokalisieren), wodurch sich der energetische Abstand zwischen angeregtem und Grundzustand verringert und das Absorptions- bzw. Emissionsmaximum sich in Richtung längerer Wellenlängen verschiebt, wobei der Absorptionsbereich umso langwelliger wird, je mehr solcher ungesättigten Bindungen konjugiert sind.

Geeignete Molekülstrukturen werden nach der Farbstofftheorie von Otto Nikolaus Witt **Chromophore** genannt, deren Schwingungseigenschaften durch **Auxochrome** (Elektronendonatoren)



und **Antiauxochrome** (Elektronenakzeptoren), die die delokalisierten π -Elektronen des Chromophors weiter verschieben und/oder polarisieren, noch einmal wesentlich beeinflusst werden können.

Chromophore

Chromophore sind jene Grundstrukturen, die delokalisierbare Elektronen enthalten. Die Art der Chromophore beeinflusst dabei über deren Absorptionsmaximum den Farbton des Farbstoffes, während die Häufigkeit der Chromophore die Farbtiefe beeinflusst. Als *Chromophore* wirken dabei insbesondere folgende Molekülstrukturen:

Chromophore					
$R-C=C-R$	$R-N=N-R$	$R-NO_2$	$R-C=O$	$R-C=NH$	$R-N=O$

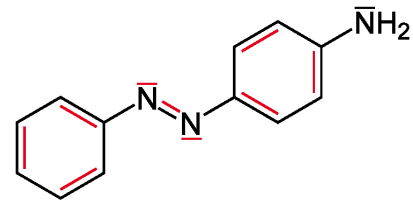
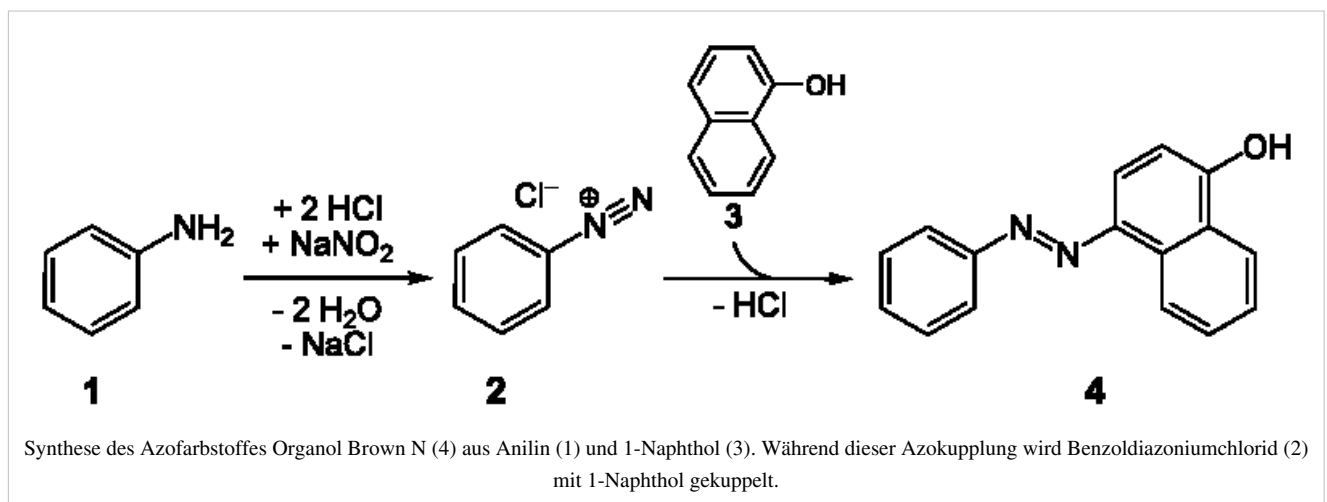
Durch die Absorption des ungesättigten Kohlenstoffs wird ein $-I$ -Effekt angeregt, der sich auf das gesamte Molekül auswirkt und dadurch eine Verschiebung der Molekülstruktur bewirkt.

Auxochrome

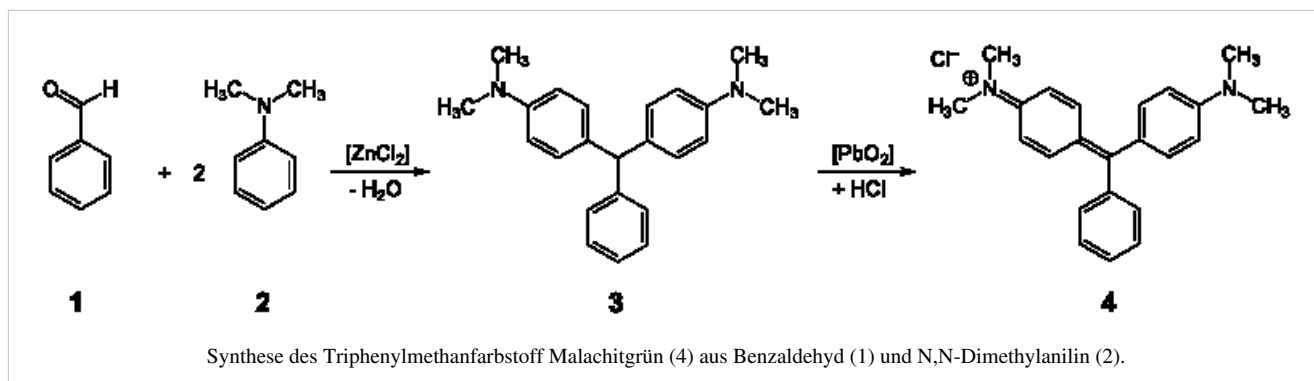
Eine weitere Anhebung kann mit funktionellen Gruppen erreicht werden, die als Elektronenakzeptoren bzw. Elektronendonatoren wirken und die Mesomerie im Molekül erhöhen, indem sie Elektronen zur auxochromen Gruppe hin oder von ihr weg verschieben. Als solche *Auxochrome* bzw. *Antiauxochrome* wirken dabei insbesondere folgende funktionelle Gruppen:

Auxochrome					Antiauxochrome					
$R-OH$	$R-O-R'$	$R-NH_2$	$R-NH-R'$	$R-NHCO-R'$	$R_2-C=O$	$R-NO_2$	$R-CHO$	$R-COOH$	$R-SO_3H$	$R-C=NR'$

Wichtige Umsetzungen für Farbstoffsynthesen



π -Überlagerung von aromatischen Ringen und einer Azogruppe am Beispiel des p-Aminoazobenzols.



Einteilung von Textilfarbstoffen

Klassifikation von Farbstoffen

Farbstoffe werden nach ihrer chemischen Struktur oder nach ihrem Anwendungsbereich klassifiziert. Ein neu entwickelter, verbesserter Farbstoff muss bestimmte Voraussetzungen erfüllen, um für einen wirtschaftlichen Verwendungszweck geeignet zu sein. Wichtige Voraussetzungen für Textilfarbstoffe sind beispielsweise Lichtechtheit (kein Ausbleichen der Farbe unter Lichteinfluss), Waschechtheit (Farbstoff darf sich beim Waschen nicht von der Faser lösen), Chlorbleichechtheit, Bügelechteit. Durch standardisierte Tests können die Eigenschaften der Farbstoffe verglichen werden. In ca. 70 DIN-Normen (54000-54077) sind die Prüfverfahren festgelegt.^[16]

Jeder Farbstoff besitzt einen vom Hersteller vergebenen Handelsnamen und seinen CI-(Colour Index-)Namen. Aus dem Handelsnamen und den nachfolgenden Buchstaben lassen sich Farbton (für einen rotstichigen Farbton steht meist *R*), Waschechtheit (*W*), Hitzebeständigkeit (*A-D*), Färbetemperatur (*M* = 40 °C, *H* = Hot = 80 °C) ermitteln. Aus dem CI-Index erkennt der Färber, um welche Farbstoffklasse, welche Substanz, welche Farbe es sich handelt. Im CI sind mehr als 10.000 Farbstoffe enthalten – mehr als 50 % davon sind Azofarbstoffe.^[17]

Färbetechnische Verfahren

Die Farbstoffmoleküle als Träger der modischen oder gewünschten Farbnuance bestimmen die koloristischen Eigenschaften, durch Einbau von entsprechenden chemischen Gruppen lassen sich die Grundkörper, in gewissen Grenzen, dem Erfordernis der Fasern anpassen, die dem Gewebe eigen sind.

Säurefarbstoffe

Anionische Farbstoffe, also Säurefarbstoffe, ziehen aus wässrigem Medium direkt auf die Faser auf. Ihrer Natur nach sind sie für Polyamidfasern und Wolle geeignet, auf denen sie mit der Aminogruppe koppeln. Unterteilt werden die Farbstoffe dabei nach ihrem Migrationsvermögen (also der Kraft, Ungleichheiten = Unequalitäten auszugleichen) und ihren Nassechtheiten. Die Nassechtheit wird bestimmt, indem ein aus gebräuchlichen Fasern hergestelltes Multifaserband unter definierten Bedingungen gewaschen wird oder in Kontakt mit Wasser oder mit Schweiß gebracht wird. Das Echtheitsmaß ist der Grad der Anschmutzung der Fasern.

Wichtige Vertreter der Säurefarbstoffe sind Naphtholgelb S, Patentblau.^[9] Säurefarbstoffe gehören auch heute noch zur wirtschaftlich bedeutendsten Farbstoffgruppe. Mit den Beizenfarbstoffen wurden im Jahr 1999 allein für Westeuropa Säurefarbstoffe im Wert von 227 Millionen Euro verkauft.^[18]

Beizenfarbstoffe

Bei den Beizenfarbstoffen werden die zu färbenden Fasern zunächst mit Chrom(III)-, Eisen(III)- oder Aluminiumsalzen behandelt. Durch anschließendes Behandeln mit Wasserdampf bilden sich auf der Faser Metallhydroxide. Diese Hydroxide reagieren dann mit dem (sauren) Farbstoff zu einer fixierbaren Komplexverbindung. Aufgrund der Schwermetallbelastung der Fasern und im Ergebnis der Abwässer werden derartige Färbungen heute praktisch nicht mehr durchgeführt.

Ein wichtiger Farbstoff dieser Gruppe ist Alizarin.^[9]

Dispersionsfarbstoffe

Die wasserunlöslichen, aber sehr feinteiligen Dispersionsfarbstoffe werden vorzugsweise zum Färben von Polyester-, Triacetat- und 2 ½-Acetatfasern eingesetzt. Nach der strengen Definition sind es Pigmente, die auf Grund der sehr geringen Teilchengröße und durch den Zusatz von Netzmitteln in Wasser leicht dispergieren. Ihr Einsatz ist für das Färben von synthetischen Fasern, die keine freien NH₂- oder OH-Gruppen besitzen, notwendig. Nur mit ihnen lassen sich auf Polyester wasch- und lichtechte Färbungen erzielen. Durch Temperatur oder Färbehilfsmittel wird die Faser „aufgeweicht“, die polymeren Moleküle werden aufgeweitet, und die Dispersionsfarbstoffe migrieren in das Faserinnere, und bei der üblichen Nutztemperatur sind Farbstoffteilchen im Molekülgitter gefangen. Auch Polyamid und Polyacrylnitril lassen sich färben, die erreichten Echtheiten sind aber teilweise schlechter im Vergleich zu Färbungen mit basischen oder sauren Farbstoffen. Die Gründe liegen in der physikalischen Halterung der Farbstoffe statt der chemischen Bindung von Farbstoffgruppen an entsprechende Fasermoleküle.

Zu den Dispersionsfarbstoffen gehören viele Azofarbstoffe, die hierfür entsprechend modifizierte Strukturen erhalten. Dispersionsfarbstoffe sind besonders durch die mechanisch hochwertigen Polyesterfasern eine sehr wichtige Farbstoffgruppe. Die gesamte gehandelte Menge hatte im Jahr 1999 für Westeuropa einen Verkaufswert von 98 Millionen Euro.

Entwicklungs- oder Kupplungsfarbstoffe

Entwicklungsfarbstoffe werden in zwei Schritten auf die Faser aufgebracht. Zuerst wird die sogenannte Grundierung aufgebracht, eine wasserunlösliche Kupplungskomponente (Naphthol AS, 2-Hydroxynaphthalein-3-Carbonsäureanilid) mit Affinität zur Cellulose. Im zweiten Schritt lässt man diese mit einem wasserlöslichen Diazoniumsalz reagieren, wodurch der eigentliche Farbstoff auf der Faser entsteht.

Wichtige Entwicklungsfarbstoffe sind Anilinschwarz und Naphtholrot, die aber ihre Bedeutung verloren haben.^[9]

Kationische (oder basische) Farbstoffe

Kationische Farbstoffe sind eine Farbstoffgruppe, die fast ausschließlich auf Polyacrylnitril-Fasern eingesetzt wird und lebhafte und hoch lichtechte Färbungen erzeugt. Basische Farbstoffe koppeln an die sauren Gruppierungen der Faser. Färbungen sind auch möglich auf anionisch modifiziertem Polyester, das als Effektfaden in einer stückgefärbten Webware zur Erzielung von Bicolorfärbungen eingesetzt wird. Gleiches gilt für anionisch modifiziertes Polyamid, das vielfach für stückgefärbte Teppiche verwendet wird. Wichtig sind sie für Differential Dyeing, wo als zweite Komponente Säurefarbstoff bindende Polyamidtypen genutzt werden. Der Farbstoffumsatz der kationischen Farbstoffe betrug in Westeuropa im Jahr 1999 etwa 68 Millionen Euro.

Küpenfarbstoffe

Küpenfarbstoffe sind wasserunlösliche Farbstoffe, die durch Reduktion (*Verküpfung*) in alkalischer Lösung zum Färben in ihre lösliche Dihydro- oder Leukoform gebracht werden. Das Anion zeigt eine ausreichende Affinität zur Baumwoll- oder Viskosefaser, so dass der Küpenfarbstoff aufziehen kann. Hier wird er durch anschließende Oxidation wieder in den unlöslichen Zustand überführt.^[19] Es kann entweder durch Luftsauerstoff oder Behandlung durch Oxidationsmittel erfolgen. Der Farbstoff wird so quasi molekular an der Faser fixiert, dieses „Ausfällen in der

Faser“ bewirkt die hohe Wasch- und Lichtechtheit.^[20]

Die wohl bekanntesten Küpenfarbstoffe sind Indigo, Purpur und die indigoiden Farbstoffe. Zur gleichen Gruppe gehören die Indanthren-Farbstoffe.^[21] Der Farbstoffumsatz der Küpenfarbstoffe betrug in Westeuropa im Jahr 1999 etwa 87 Millionen Euro.

Metallkomplexfarbstoffe

Metallkomplexfarbstoffe, die teilweise zu den Säurefarbstoffen zählen, enthalten komplexartig gebundenes Chrom, Kobalt oder Kupfer als Zentralatom. Es gibt Metallkomplexfarbstoffe mit unterschiedlicher Anzahl an Säuregruppen ($-\text{SO}_3\text{H}$). Entsprechend unterschiedlich ist die Stärke der Wechselwirkung mit dem Substrat. In der Regel handelt es sich um Azofarbstoffe, jedoch gehören auch Phthalocyanine dieser Gruppe an. Die heute verwendeten Farbstoffe sind ökologisch unbedenklich und erzeugen ein höheres Nassechtheitsniveau als metallfreie Säurefarbstoffe. Im Farbstoff ist nur noch ein äußerst geringer Rest an freiem Metall (vor allem Chrom) enthalten, der sich später auf der Faser nicht mehr nachweisen lässt.

Pigmentfarbstoffe

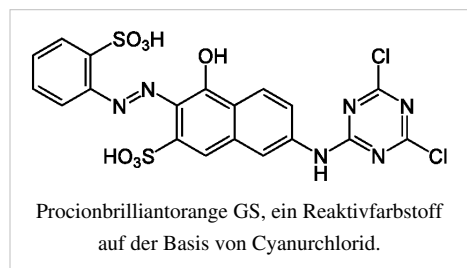
Pigmentfarbstoffe sind jene Farbstoffe, die durch Verlackung an der Sulfon- oder Carboxygruppe Pigmenteigenschaften gewonnen haben (Kondensationspigmente). In der Textilfärberei werden sie mittels Bindemittel, Verdickungsmittel und auch Weichmacher im Textildruck oder beim Färben auf die Textilfaser aufgebracht. Durch die Verlackung verbessern sich die Lichtechtheiten, aber Reib- und Lösemittlechtheiten sind geringer, da letztlich keine weitere chemische Kopplung an die Faser vorliegt. Weltweit werden mehr als 50 % der Textildrucke mit Pigmentfarbstoffen erstellt, Pigmentfärbungen sind dagegen selten bei hellen und eventuell bei mittleren Nuancen anzutreffen. Die Reibechtheiten reichen für dunkle Nuancen nicht. Die Färbung mit Pigmentfarbstoffen ist durch die mechanische Fixierung mit Bindemittel auf allen Faserarten geeignet und wird vor allem bei preiswerten Artikeln angewandt.

Reaktivfarbstoffe

Reaktivfarbstoffe^[22] stellen heute die größte Farbstoffgruppe zum Färben von Cellulose dar. Reaktivfarbstoffe bilden mit der Faser eine kovalente Bindung, wodurch sich nassechte Färbungen ergeben. Reaktivfärbungen übertreffen andere auch in der Farbbrillanz. Wolle/Polyamid kann ebenfalls mit Reaktivfarbstoffen in tiefen Nuancen gefärbt werden.

Chemisch gesehen bestehen die Reaktivfarbstoffe aus zwei Teilen: einem chromophoren Teil (etwa einer Azoverbindung $\text{N}=\text{N}$) und daran angeschlossen einer reaktiven Gruppe (bei bifunktionellen Reaktivfarbstoffen auch mehrere Reaktivgruppen). Die reaktive Gruppe kann beispielsweise durch Umsetzung mit Cyanursäurechlorid an die Farbstoffgruppe gekuppelt werden. Farbstoffe auf Basis von Cyanurchlorid enthalten zwei Chloratome, die während der Fixierung mit den Hydroxygruppen der Cellulose oder mit Aminogruppen von Wolle und Polyamid-Fasern substituiert werden können. Dies bewirkt eine kovalente Vernetzung der Fasern mit dem Farbstoff.^[23]

Bei *Remazol*-Farbstoffen handelt es sich bei der reaktiven Gruppe um eine Vinylsulfongruppe, die beim Färben aus in den Farbstoffen enthaltenen Sulfonylethylhydrogensulfaten gebildet werden,^[24] bei *Levafix*-Farbstoffen liegt die Gruppierung $-\text{SO}_2-\text{NH}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-\text{SO}_3\text{H}$ vor.^[25] Reaktivfarbstoffe waren im Jahr 1999 eine sehr wichtige Farbstoffgruppe mit einem Umsatz für Westeuropa von 211 Millionen Euro (ca. 25 % des Gesamtfarbstoffumsatzes).



Substantive Farbstoffe

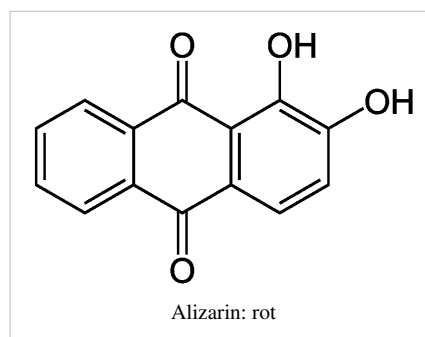
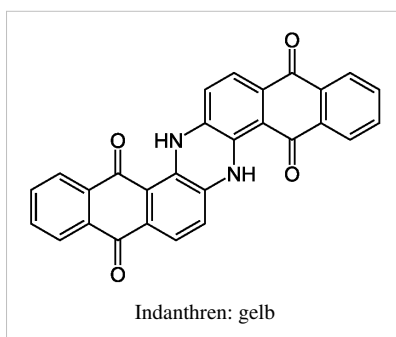
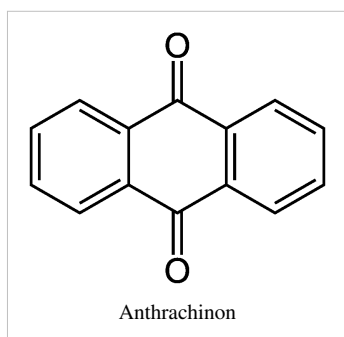
Substantive Farbstoffe (oder auch Direktfarbstoffe) werden aus wässriger Lösung direkt auf die Faser aufgetragen. Sie sind besonders für die Anwendung auf Cellulose geeignet. In früheren Zeiten wurden sie auch auf Polyamid gefärbt, das findet heute wegen gestiegener Echtheitsanforderungen nur noch im Ausnahmefall statt. Diese Farbstoffe bilden hauptsächlich Nebenvalenzen (Wasserstoffbrückenbindungen und Van der Waals Bindungen), was deren geringe Echtheit begründet.

Wichtige Vertreter dieser Klasse sind Kongorot, Benzopurpurin.^[9] Der Umsatz für Westeuropa betrug für diese Farbstoffgruppe im Jahr 1999 etwa 71 Millionen Euro.

Chemische Strukturen

Anthrachinonfarbstoffe

Anthrachinonfarbstoff oder *Alizarinfarbstoffe* zeichnen sich auf vielen Fasern durch große Wasch- und Lichtechtheit aus (Indanthrenfarbstoffe) und leiten sich alle vom Anthrachinon und dem Alizarin ab.



Azofarbstoffe

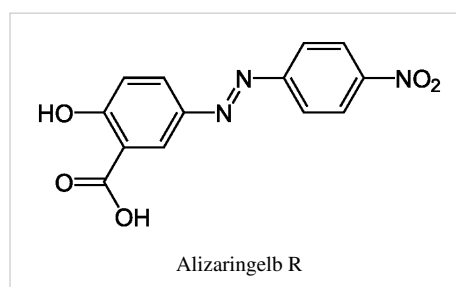
Zentraler Bestandteil der *Azofarbstoffe* ist die Azogruppe ($R-N=N-R'$), die als chromophore Gruppe wirkt. Die Farbstoffsynthese erfolgt durch:

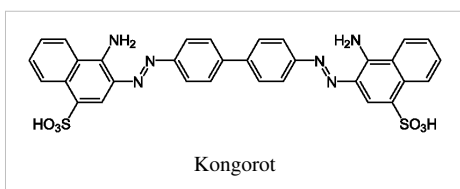
1. Diazotierung aromatischer Amine zu Diazoniumkationen,
2. Azokupplung des erhaltenen Diazoniumkations auf aromatische Phenole oder Amine (seltener β -Dicarbonyl-Verbindungen).

Man kann die Farbstoffe nach der Anzahl der Azogruppen im Farbstoffmolekül weiter unterteilen in Mono-Azofarbstoffe, Di-Azofarbstoffe mit zwei Azogruppen und Poly-Azofarbstoffe mit mehreren Azogruppen. Azofarbstoffe sind meist empfindlich gegen Reduktionsmittel; sie werden an der Azobrücke wieder gespalten und entfärben sich. In fast allen Farbstoffgruppen sind Azofarbstoffe vertreten und bilden die zahlenmäßig größte Gruppe. Bekannte Vertreter der Azofarbstoffe sind das Kongorot und das Alizarin gelb R, auch das weiter oben betrachtete Orange 2,4-Diaminoazobenzol zählt hierzu.

Dioxazinfarbstoffe

Dioxazinfarbstoffe enthalten mehrere Chromophore, die die Farbstärke bedingen. Die langwellige Verschiebung des Absorptionsmaximums ergibt ihren violetten Blauton.

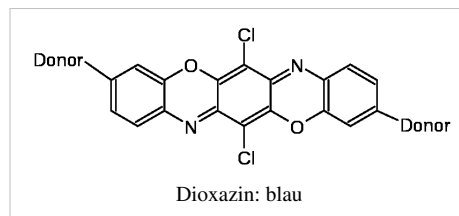




Je nach Abwandlung des Grundgerüsts erfolgt ihr Einsatz als Pigment oder mit koppelnden Gruppen als Direkt- oder Reaktivfarbstoff.

Indigofarbstoffe

Alle Indigofarbstoffe sind Küpenfarbstoffe, speziell Indigo selbst sowie indigoide Farbstoffe wie Purpur (Farbstoff).

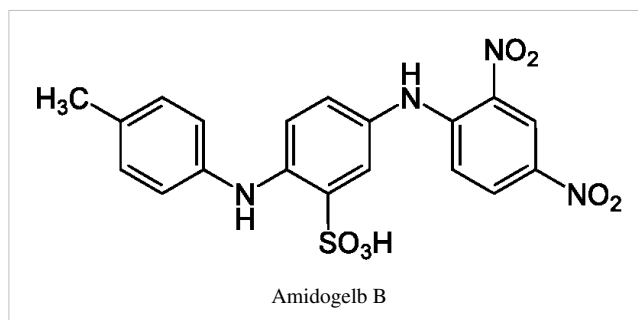
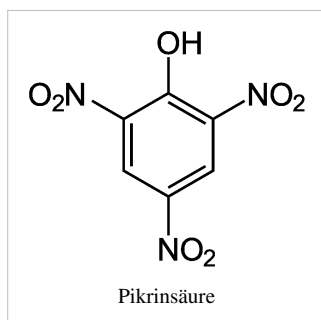


Nitro- und Nitrosofarbstoffe

Bei diesen Farbstoffen ist der Elektronendonator entweder eine Hydroxy- ($-\text{OH}$) oder eine Aminogruppe ($-\text{NH}_2$). Diese steht in einem aromatischen π -Elektronensystem mit einer Nitro- oder Nitrosogruppe in Konjugation.

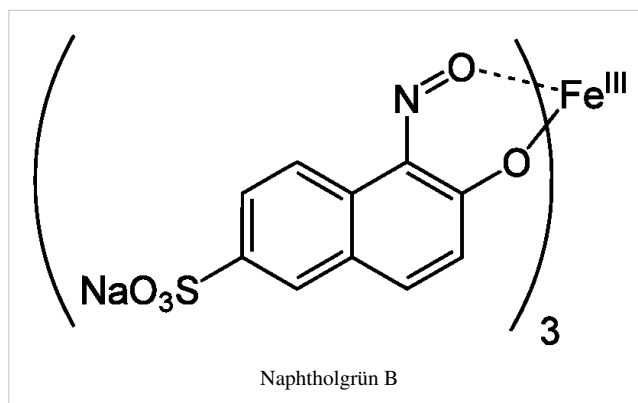
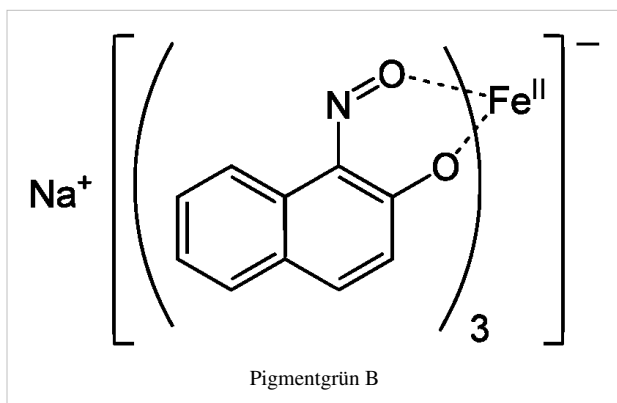
Einer der Vertreter der Aminonitrofarbstoffe ist die Pikrinsäure (2,4,6-Trinitrophenol) oder das Amidogelb B:

Aminonitrofarbstoffe



Als wichtige Vertreter der Hydroxynitrosofarbstoffe gelten Pigmentgrün B oder das Naphtholgrün B, die mit Fe(II) einen Komplex bilden:

Hydroxynitrosofarbstoffe



Phthalocyaninfarbstoffe

Phthalocyaninfarbstoffe leiten sich von Phthalocyanin ab und finden vornehmlich in der Kunststoffverarbeitung als Pigmentfarbstoffe Verwendung. Als besondere Eigenschaften können Phthalocyaninfarbstoffe eine im Allgemeinen vorhandene starke Säure-, Laugen- und Lichtbeständigkeit aufweisen.

Schwefelfarbstoffe

Schwefelfarbstoffe (Sulfinfarbstoffe) sind wasserunlösliche, schwefelhaltige Farbstoffe. Sie werden durch Schmelzen von Benzol-, Naphthalin- oder Anthrazenderivaten mit Schwefel gewonnen und sind von unbekannter Konstitution. Sie sind besonders geeignet zum Färben von Baumwolle. Der Farbstoff wird mit Natronlauge und Dithioniten oder Natriumsulfid in die wasserlösliche Form reduziert (Leuko-Verbindung) und nach Aufziehen auf die Faser durch Oxidation auf dieser unlöslich fixiert. Schwefelfarbstoffe sind besonders wasch- und lichtecht, die Farbtöne sind meist gedeckt.

Triphenylmethanfarbstoffe

Namensgebend ist der Grundbaustein Triphenylmethan. Mindestens zwei der aromatischen Ringe des Triphenylmethanfarbstoffs tragen elektronenliefernde Substituenten. Triphenylmethanfarbstoffe finden hauptsächlich in der Drucktechnik oder als Indikatoren Anwendung und sind im Allgemeinen wenig lichtecht. Vertreter hier sind Fuchsin, Kristallviolett, Phenolphthalein, Fluorescein, Eosin, Bromphenolblau.

Herstellung

Die Farbstoffproduktion umfasst mehrere Arbeitsgänge nach der synthetischen Darstellung des entsprechenden Produktes. Die Operationen beinhalten die Filtration, Trocknung, Mahlen und Einstellen.

In der Pigmentindustrie oder bei schlecht wasserlöslichen Farbstoffen hat das Mahlen großen Einfluss auf den Färbungsprozess (Farbton, Farbstärke). Für wasserlösliche Farbstoffe sollte die Teilchengröße zwischen 1–50 Mikrometer liegen. Durch das Einstellen können Farbton und Farbstärke den Erfordernissen angepasst werden. Zur Messung von Farbton, Farbstärke und Korngrößen gibt es heutzutage sehr preisgünstige Messgeräte.

In den sechziger und siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts nahm auch der Einsatz von konzentrierten Farbstofflösungen zu, dadurch wurde die Staubbelastung in Färbereien geringer.

Funktionelle Farbstoffe

Funktionelle Farbstoffe haben eine eher unkonventionelle Anwendung. Konventionelle Farbstoffe dienen zum Färben von Textilien, Leder, Papier. Unkonventionelle Farbstoffe werden in anderen Einsatzbereichen verwendet.^[26]

Aus der Kenntnis der Farbabsorption von aromatischen oder mehrfach ungesättigten Verbindungen nach der Hückel-Regel kann man spezielle Farbstoffe herstellen, die

- Licht bei einer bestimmten Wellenlänge absorbieren und das absorbierte Licht in Wärme umwandeln (beispielsweise in DVDs, in der chemischen und biochemischen Analytik),^[26]
- das Licht bei einer anderen Wellenlänge wieder emittieren (als phosphoreszierende Biomarker oder Tinten, Fluoreszenz bei Farbstofflasern, Chemilumineszenz zum Brechen oder Neuknüpfung von chemischen Bindungen in der Biochemie),^[26]
- die Polarisationsrichtung des Lichts verändern (wie bei der Frequenzverdoppelung oder als optische Schalter),
- elektrische Phänomene bewirken (in der Anwendung bei Laserdruckern),
- fotochemische Prozesse ermöglichen.

Ökonomisch ist der Einsatz von *funktionellen* Farbstoffen für die Herstellung von CDs, DVDs besonders wichtig. Die Farbstoffmoleküle sind im Polycarbonat einer CD oder DVD enthalten. Durch den Laserstrahl des Brenners nehmen Farbstoffmoleküle Lichtenergie auf und setzen diese in Wärme um. Durch die Wärmeaufnahme schmilzt der

Kunststoff, das Polycarbonat, an dieser Stelle. Die Oberfläche hat sich leicht verändert, die veränderte Oberflächenstruktur wird beim Leseprozess wahrgenommen.^[27]

Gegenwärtige Farbstoff-Produktionsmengen

Substanzklasse	Jahresproduktion in Tonnen	Umsatz in Millionen Euro
Dispersionsfarbstoffe	3.911	31,0
Säure- und Beizenfarbstoffe	16.367	84,0
Basische Farbstoffe	9.084	32,3
Direktfarbstoffe	25.034	61,3
Andere Küpenfarbstoffe, Reaktivfarbstoffe, organische Pigmente	134.504	802,6
Optische Aufheller	102.295	111,3

l+ Produktion von Farbstoffen in Deutschland 2007^[28]

Substanzklasse	Jahresproduktion in 1000 t 1998	Jahresproduktion in 1000 t 1999
Säure-, Metallkomplexfarbstoffe	23,0	18,9
Azo-, Naphtholfarbstoffe	6,5	2,9
Basische, kationische Farbstoffe	13,0	14,8
Direktfarbstoffe	16,0	8,6
Dispersionsfarbstoffe	24,0	23,5
Reaktivfarbstoffe	19,0	27,4
Küpenfarbstoffe, Indigo	11,0	5,5
Schwefelfarbstoffe	12,0	7,0
Sonstige	6,0	13,8

l+ Produktion von Farbstoffen in Westeuropa^[18]

Die Zahl der neuentwickelten Farbstoffe ist in den letzten Jahren stark zurückgegangen. Zwischen 1995–1998 arbeiteten die europäischen Hersteller im Farbstoffsektor mit extrem schlechten Ergebnissen. Allein zwischen 1998 auf 1999 sank der Umsatz um 20 %. Insbesondere Umweltkosten und Importdruck aus Asien führten zu erheblichen Umstrukturierungen in den USA und Westeuropa. Es kam zu vielen Fabrikschließungen.^[18]

Der Weltumsatz für Farbstoffe (ohne Pigmente und optische Aufheller) betrug im Jahr 1999 6,6 Mrd. USD, das waren 0,7 % des Weltchemieumsatzes. Große Farbstoffhersteller sind Huntsman (ehemals Ciba) (15 %, Weltfarbstoffumsatz), DyStar (14 %, übernommen 2010 von Kiri Dyes and Chemicals, Indien), BASF (11 %, seit 2000 zu Dystar) und Clariant (8 %).^[18]

Siehe auch

- Liste der Farbstoffe, nach Farbe sortiert

Literatur

- J. Fabian, H. Hartmann: *Light Absorption of Organic Colorants. Theoretical Treatment and Empirical Rules*. Springer, Berlin 1980, ISBN 354009914X.
- Helmut Schweppe: *Handbuch der Naturfarbstoffe. Vorkommen - Verwendung - Nachweis*. ecomed, Landsberg/Lech 1993, ISBN 360965130X.
- Lutz Roth, Kurt Kormann, Helmut Schweppe: *Färbepflanzen - Pflanzenfarben. Botanik - Färbemethoden - Analytik - Türkische Teppiche und ihre Motive*. ecomed, Landsberg/Lech 1992, ISBN 3-609-65490-2.
- Heinrich Zollinger, A. Iqbal: *Color Chemistry: Syntheses, Properties and Applications of Organic Dyes and Pigments*. 3. Aufl. Auflage. Helvetica Chimica Acta / Wiley-VCH, Weinheim 2003, ISBN 3906390233.
- Sabine Struckmeier: *Naturfarbstoffe: Farben mit Geschichte*. In: *Chemie in unserer Zeit*. 37, Nr. 6, 2003, S. 402–409, doi:10.1002/ciuz.200300275 ^[29].

Weblinks

- Thomas Seilnacht: *Lexikon der Pigmente und Farbstoffe* ^[30]
- Lexikon der Färbepflanzen ^[31]

Einzelnachweise

- [1] Wolfgang Glöckner, Walter Jansen, Rudolf G. Weißenhorn (Hrsg.): *Handbuch der experimentellen Chemie Sekundarbereich II*. Band 10, Aulis Verlag Deubner & Co. KG, Köln, S. 304–309.
- [2] Christian-Herbert Fischer: *Historische Farbstoffe*. In: *Spektrum der Wissenschaften*. Nr. 10, 1997, S. 104 ff.
- [3] *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie*. 4. Auflage. Band 11, Stichwort: Farbstoffe, natürliche, S. 103.
- [4] Heinrich Kläui, Otto Isler: *Warum und womit färbt man Lebensmittel?*. In: *Chemie in unserer Zeit*, 2/1981, S. 1-9
- [5] Karl Aloys Schenzinger: *Anilin*. Zeitgeschichte-Verlag Berlin 1937
- [6] Hans Joachim Störig: *Kleine Weltgeschichte der Wissenschaft* 2. 4. Auflage. Fischer Taschenbuch, 1982, ISBN 3-596-26399-9, S. 136–137.
- [7] Karl Hübner: *Historie: 150 Jahre Mauvein*. In: *Chemie in unserer Zeit*. 40, Nr. 4, 2006, S. 274–275, doi: 10.1002/ciuz.200690054 (<http://dx.doi.org/10.1002/ciuz.200690054>).
- [8] Joachim Rudolf: *Knauers Buch der modernen Chemie*. Th. Knauer Nachf., München/Zürich 1975, ISBN 3-426-00381-3, S. 257–263.
- [9] Hermann Raaf: *Organische Chemie im Probierglas*. 13. Auflage. Kosmos Verlag, Stuttgart 1975, ISBN 3-440-04266-9, S. 186.
- [10] *Farbstoffe*. In: *Römpf Chemie Lexikon*. 8. Auflage. Franckh'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- [11] *Farbstoffe*. In: *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie*, 3. Auflage. Band 7, S. 185.
- [12] *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie*. 4. Auflage. Band 20.
- [13] *Dispersionsfarbstoffe*. In: *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie*. 4. Auflage. Band 10.
- [14] Friedrich Ische: *Farbstoffe*. In: *Angewandte Chemie* 2, Fischer Taschenbuch, Frankfurt a. M. 1977, ISBN 3-436-02460-0, S.174–192.
- [15] Semir M. Zeki: *Das geistige Abbild der Welt*. In: *Spektrum der Wissenschaften*. Nr. 11, 1992, S. 54–63.
- [16] *Farbstoffe*. In: *Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik*. Zweiburg Verlag, Weinheim 1981, S. 1308.
- [17] Kirk-Othmer, Jacqueline I. Kroschwitz: *Encyclopedia of Chemical Technology*. 5. Ausgaben, Vol. 9, S. 349.
- [18] Roland Dittmeyer, Wilhelm Keim, Gerhard Kreysa, Karl Winnacker, Leopold Küchler: *Chemische Technik, Prozesse und Produkte*. Band 7, Industrieprodukte, 5. Auflage. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004, ISBN 3-527-30772-9, S. 397 ff.
- [19] Bertram Philipp, Peter Stevens: *Grundzüge der Industriellen Chemie*, VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1987, S. 321, ISBN 3-527-25991-0.
- [20] Wittko Francke, Wolfgang Walter: *Lehrbuch der Organischen Chemie*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 2004, ISBN 3-7776-1221-9, S. 684f.
- [21] Indanthren ist eingetragenes Warenzeichen der DyStar Textilfarben
- [22] H. Zollinger: *Chemismus der Reaktivfarbstoffe*. In: *Angew. Chem.* 73, Nr. 4, 1961, S. 125–136 (doi: 10.1002/ange.19610730402 (<http://dx.doi.org/10.1002/ange.19610730402>)).
- [23] Wittko Francke, Wolfgang Walter: *Lehrbuch der Organischen Chemie*. 24. Auflage 2004. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, ISBN 3-7776-1221-9, S. 640.
- [24] J. Heyna: *Reaktivfarbstoffe mit Vinylsulfongruppen*. In: *Angew. Chem.* 74, Nr. 24, 1962, S. 966–969 (doi: 10.1002/ange.19620742403 (<http://dx.doi.org/10.1002/ange.19620742403>)).
- [25] K. G. Kleb: *Levafix-Farbstoffe, Chemismus und Praxis*. In: *Angew. Chem.* 74, Nr. 17, 1962, S. 698–699 (doi: 10.1002/ange.19620741722 (<http://dx.doi.org/10.1002/ange.19620741722>))

- [26] John Griffiths: *Funktionelle Farbstoffe. Ein neuer Trend in der Farbstoffchemie*. In: *Chemie in unserer Zeit*. 27, Nr. 1, 1993, S. 21–31 (doi: 10.1002/ciuz.19930270104 (<http://dx.doi.org/10.1002/ciuz.19930270104>)).
- [27] Klaus Roth: *Die Chemie der schillernden Scheiben: CD, DVD & Co*. In: *Chemie in unserer Zeit*. 41, Nr.4, 2007, S. 334–345 (doi: 10.1002/ciuz.200700428 (<http://dx.doi.org/10.1002/ciuz.200700428>)).
- [28] Statistisches Bundesamt, Fachserie 4, Reihe 3.1, Jahr 2008.
- [29] <http://dx.doi.org/10.1002/ciuz.200300275>
- [30] <http://www.seilnacht.com/Lexikon/FLexikon.htm>
- [31] <http://www.digitalefolien.de/biologie/pflanzen/faerbe/faerbe.html>

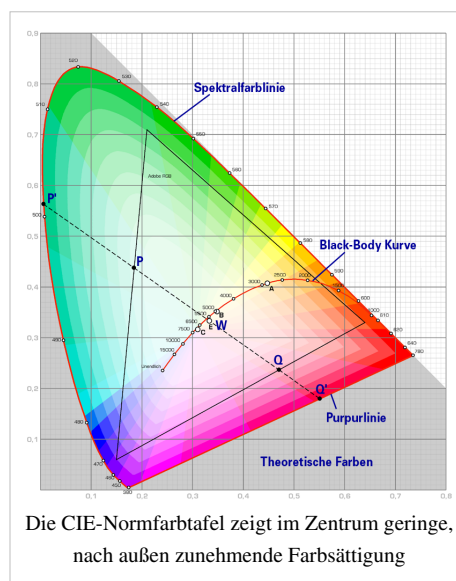
bjn:Kasumba

Farbsättigung

Die **Farbsättigung**, **Sättigung** ist – neben Farbton und Helligkeit – eine der drei vom Menschen als grundlegend empfundenen Eigenschaften einer Farbe. Sie beschreibt die Qualität der Farbwirkung. Spezielle Wertigkeiten wie **Buntheit**, **Farbigkeit** (**Farbintensität**), **Chromatizität**, **Farbtiefe**, **Brillanz**, **Graustich** beschreiben verwandte Phänomene für *bunte* und *unbunte* Farben.

- **Unbunte Farben** sind Weiß, Schwarz und deren Mischungen in verschiedenen Grau.
- **Bunte Farben** sind Farben mit Buntwirkung.

Diese Unterscheidung liegt darin, dass in der Farblehre – dem Sprachgebrauch entgegengesetzt – Weiß und Schwarz ebenso ‚Farben‘ sind wie Rot oder Grün – ‚bunt‘ bezeichnet also fachsprachlich, was die Alltagssprache ‚farbig‘ nennt. *Bunt* bezeichnet in diesem Sinne in der Farbtheorie die (Reinheit der) Spektralfarben, also einen maximalen Farbsättigungsgrad, *unbunt* bezeichnet Farben die keinerlei Farbeindruck hinterlassen.



Grundlagen

Eine Farbe kann durch Angabe von drei Eigenschaften in einem Farbmodell eindeutig beschrieben werden. Werden sie quantifiziert, so spannt das Kartesische Produkt aller möglichen Werte einen dreidimensionalen Raum auf, den Farbraum.

Prinzipiell können die Achsen im Farbraum beliebig gelegt werden. Während die Achsen des Farbtons als intuitiv erkennbar und die der Farbhelligkeit als physikalische Messung des Lichtstroms recht einleuchtend sind, ist die Wahl der dritten Achse, die im Prinzip die „Farbkraft“ beschreibt, nicht so einfach und es ergeben sich je nach Farbmodell verschiedene Definitionen. Außerdem kommen hierbei einige Effekte der Farbwahrnehmung zum tragen, die über das dreidimensionale Modell hinausgehen, und ein fünfdimensionales Farbwahrnehmungsmodell mit Hintergrundbeleuchtung (*Umgebungscontrast*) und Gesamtlichteinfall oder (passender) der Adaptation des Auges daran erfordern würden.

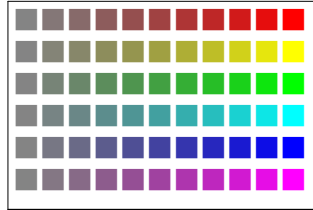
Messwerte an Farbräumen

Farbton, Buntton (hue)

Diese Komponente geht vorrangig auf die Farbnamen zurück, die die Art der Farbempfindung mit Begriffen beschreiben. Auf Grundlage des Farbkreises können diese verbalen Bezeichnungen auch alphanumerisch dargestellt werden.

Sättigung (saturation)

Gleichmäßige⁽¹⁾ Entsättigung in Unbunt (Neutralgrau)⁽²⁾



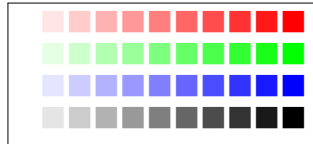
Die *Sättigung* beschreibt „wie stark sich ein farbiger Reiz von einem achromatischen Reiz unabhängig von dessen Helligkeit unterscheidet“^[1], also sein Abstand von der *Unbunt-Achse* (Schwarz–Weiß-Achse).

Verwendung:

- CIE-Normvalenzsystem
- DIN 6124 (Farbsystem nach Richter), hier als *DIN-Sättigungsstufe S* genannt
- HSV-Farbraum, der die Sättigung direkt als eine der drei Koordinaten verwendet
- Munsell-Farbsystem

Buntheit (chroma)

Gleichmäßige⁽¹⁾ Entfärbung in Unbunt (Weiß)



Die *Buntheit* beschreibt die *relative Farbwirkung* im Verhältnis zum Referenzweiß, also im Vergleich zu einem bestimmten hellsten Punkt eines Farbraums. Die Buntheit eignet sich als Messwert etwa für kegelförmige Farbräume, wo von der Spitze aus gemessen werden kann. Diese Systeme sind im Druckwesen praktisch, wo das Papierweiß die Nullfarbe darstellt, und für sattes Schwarz genauso viel Farbauftrag notwendig ist, wie für sattes Rot.

Verwendung:

- Im CMYK-Farbmodell des Vierfarbdrucks spricht man von *Unbuntaufbau*, *Unbuntanteilen* – das ist die Komponente des – für den Farbmeter unnötigen, die Drucktechnik aber zielführenden – zusätzlichen Schwarzwerts (K) zu den drei Buntfarben Cyan (C), Magenta (M) und Gelb (Y).

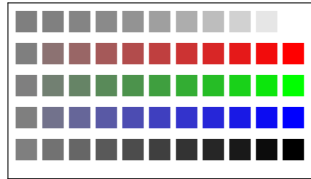
Chromatizität (chromaticity)

Das CIE-Farbmodell spricht explizit von engl. *chromaticity* (so als *chromaticity diagram* für die CIE-Normfarbtafel, das bekannte x-y-„Schuhsohlen“bild), sodass sich hierfür auch deutsch *Chromatizität* findet. Der Ausdruck soll sich vom allgemeinen englischen Ausdruck *chroma* für ‚bunt, farbig‘ abgrenzen. Da das x-y-Diagramm eine Projektion des Farbraums entlang der Schwarz–Weiß-Achse ist, fallen hierbei der Abstand zum Unbuntpunkt und der zum Weißpunkt zusammen, weil diese auf dieselbe x/y-Koordinate projiziert werden – in Diagrammen dargestellt ist dieser Punkt meist weiß, es handelt sich also um eine Ansicht den Farbraumes „von oben“, nicht einen Schnitt

entlang der x-y-Ebene des CIE-Modells.

Grauanteil (Graustich, *grayness*)

Gleichmäßige⁽¹⁾ Entfärbung in Neutralgrau⁽³⁾



Der *Grauanteil* (*Graustich*) ist die Verschiebung eines Farbbortes in Richtung *Graupunkt*, er gibt an, wie stark eine Farbe ins Grau „entsättigt“ ist.

Dieser Messwert eignet sich speziell für kugelförmige Modelle und ist hier der Abstand zum Kugelmittelpunkt: Farben mit gleichem Grauanteil sind gleich „graustichig“, egal, ob Weiß, Schwarz, oder ein Buntton. Da aber verschieden Farbmodelle unterschiedliche Skalierungen an die Schwarz–Weiß-Achse legen, ist der Graupunkt, die „Mitte“ zwischen Schwarz und Weiß, in den diversen Modellen von anderer Farbhelligkeit. Solche möglichen Skalierungen sind photometrische oder visuelle, lineare oder logarithmische (dem Weber-Fechner-Gesetz folgend) oder durch Potenzen angenäherte Helligkeitswerte.

Der Grauwert kann für eine einzelne Farbe als Vektor angegeben werden, oder global als Vektorfeld: Das wird etwa in der Bildbearbeitung zur Farbkorrektur oder dem Gamut-Matching, der Anpassung der vorhandenen Farben an die darstellbaren Farben, benutzt.

Werte der Farbwahrnehmung

Die folgenden Begriffe gehen schon über ein rein dreidimensionales Farbmodell hinaus und beschäftigen sich mit Farbwahrnehmung einer Farbe im Kontext einer Umgebung, und Feinheiten des Sehsystems.

Farbigkeit oder Farbintensität

Die *Farbigkeit* oder *Farbintensität* ist die *wahrgenommene Buntheit*. Auch als *colorfulness* oder *chromaticness* bezeichnet stellt diese Komponente ein erweitertes Konzept der Sättigung dar.

Mit zunehmender Leuchtdichte nimmt auch der Eindruck von Sättigung zu^[2] – beleuchtete Flächen wirken farbstärker als bei wenig Helle, obwohl sie gemessen gleich gesättigt sind (dunkle Farben wirken farbiger als helle, gleich satte), umgekehrt verschwindet bei mangelnder Beleuchtung jegliche Wahrnehmungsfähigkeit für Buntheit (Dunkelsehen, „bei Nacht sind alle Katzen grau“).

$$\text{Sättigung} = \frac{\text{Buntheit}}{\text{relativeHelligkeit}} = \frac{\text{Farbigkeit}}{\text{Helligkeit}} \quad [3]$$

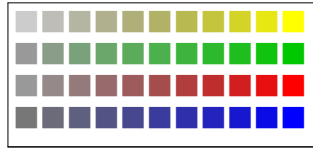
relative Helligkeit ist hierbei die farbmtrische Helligkeit, *Helligkeit* die photometrische Helligkeit

Die Sättigung lässt sich mit einer Definition beschreiben, die auf Manfred Richter zurückgeht. Danach ist die Sättigung der Buntanteil am Gesamtfarbeindruck. Diese Definition wurde von E. Lübbe in die folgende Formel umgesetzt, die experimentell nachgewiesen mit dem visuellen Sättigungseindruck übereinstimmt.^[4]

$$S = \frac{C}{\sqrt{C^2 + L^2}} 100\%$$

S Sättigung, L Helligkeit, C Chroma, Buntheit

Entsättigung in vergleichbares Grau



Allerdings wirken Blautöne – bei gleicher farbmimetrischer Sättigung und gleicher Beleuchtung – deutlich dunkler als andere Farbtöne. Gelb wirkt von Natur aus besonders hell. Um auf visuell gleichmäßige Skalen zu gelangen, verwenden farbmittelorientierte Systeme daher Konzepte der Farbwirkung, die von der photometrischen Sättigung und dem Farbton abhängen.

Verwendung:

- Auf diesen Effekt geht etwa das ungarische Coloroid-System ein (*Coloroid saturation T*)^[5]
- Das NCS-Farbmustersystem verwendet die Buntheit als *Vollfarbenanteil* (engl. *chromaticness*)^[6]

Farbtiefe

Auch als *color depth*, Brillanz (*brilliance*) und Farbreinheit (*hue purity*) bezeichnet.

Die *Farbtiefe* beschreibt die *scheinbare Sättigung* realer Farbmittel in der Anwendung, und ist ein Maß, wie stark sich die *Farbstärke* (Färbekraft) des Mittels auf den Farbauftrag auswirkt. Die reine Dicke der Farbschicht selbst wirkt sich auf die Farbigekeit ebenso aus wie das Durchscheinen des Untergrunds, so wirken manche Ölfarben aus der Tube stumpf oder einfach schwarz, und zeigen ihre Farbkraft erst beim fein ausmalen (Lavurfarben). Dasselbe gilt für Aquarellfarben. Diese Erscheinung findet sich auch in der chinesischen Tuschemalerei, wo selbst mit (gesättigt) schwarzen Tuschen durch feinste Farbstiche des Farbmittels in der Lavur und die Wechselwirkung mit der Malseide enorme farbliche Wirkung erzeugt wird.

Farbwirkung ist eine Folge der Spektralverteilung, verschiedene Spektren können durchaus denselben Farbeindruck erzielen. Dadurch unterliegen Körperfarben nicht mehr einer theoretischen additiven Farbmischung, zwei hochbunte, schöne Pigmente können zusammengemischt eine erstaunlich trübe Farbe ergeben. *Brillanz* ist ein Maß für die Spektralverteilung – auf Farbe bezogen, ist *Farbreinheit*^[7] der Anteil des Spektrums, der auf die Frequenz der farbtongleichen Spektralfarbe entfällt: Je brillanter das Spektrum, desto gesättigter der Farbton, und desto besser eignen sich diese Pigmente oder Farbstoffe für gesättigtes und farbreines Mischen untereinander.

Dazu kommen noch zahlreiche weitere Effekte^[8], die die Farbwirkung farbiger Oberflächen beeinflussen. *Glanz* ist vom gerichteten Licht punktförmiger Lichtquellen abhängig, durch die auf glänzenden Oberflächen oder transparenten Materialien durch Spiegelung der Lichtquelle oder Brechung des Lichts entstehen. Daher wirken etwa gefirnisste Ölbilder farbiger als solche ohne Deckanstrich, und nasse Flächen bunter als trockene. Effekte wie das *Tiefenlicht* (Reflexionen aus dem Inneren des Farbkörpers) kommen ebenfalls zum tragen, was in der Maltechnik durch sorgfältigen („altmeisterlichen“) Malschichtenaufbau unterstützt wird. Eine Hochblüte der farblich intensiv wirkenden, obschon in gebrochenen – unbunten – Farben gemalten Bildern erlebt diese Technik in Renaissance und Barock, wie bei den Niederländern um Rembrandt, oder dem *Sfumato* des da Vinci, daher der Ausdruck. In Reproduktionen solcher Objekte verschwinden diese Effekte, sie sind nur am Original festzustellen.

Anwendungen

Buntheit im Alltag

In nicht sonderlich präziser Ausdrucksweise heißt „bunt“ – neben „vielfarbig“ – im allgemeinen Sprachgebrauch auch „hohe Farbtiefe“. *Unbunt* bedeutet „nicht bunt“ und wird in der deutschen Umgangssprache nicht verwendet, sondern die Farbe Grau wird unpräzise als „farblos“ bezeichnet, Schwarz mit „dunkel“ gleichgesetzt und Weiß als wegzudenkende übliche Farbe des Hintergrundes angenommen.

Siehe hierzu *Farbton, Helligkeit, bunte und unbunte Farben* im Artikel Farbe

Im Kontext der Beschränkungen, die der Gebrauch von Farbmitteln auferlegt, werden etwa Pigmente abnorm hoher Sättigung, wie Preußischblau, Karmin als „hochbunt“ bezeichnet. Diese sind weder drucktechnisch noch auf Bildschirmen korrekt wiederzugeben.

Im Kontext des Ausdruckes „Brillanz“ sind farbsatte oder hochbunte Flächen, farbintensive Leuchtfarben, farbtiefe Signalfarben und glänzende Flächen mit Glanzlack oder Effektpigmenten (*Perlglanz, Metallizé*), wie auch allgemein beleuchtete und selbstleuchtende Flächen im allgemeinen Verständnis „leuchtend“, „bunt“, „farbig“ oder „farbintensiv“, auch „Neonfarben“. Insgesamt setzen all diese Farbeindrücke die Fläche von der Umgebung ab und sind im Sicherheitswesen und in der Werbung von Vorteil. Die technische Entwicklung und der entstehenden Möglichkeiten führte zu etwas wie einer „Inflation an Buntheit“, die daraus folgend wieder neue Farbmittel oder technische Effekte erfordert.



Sättigungsstufen, von unten links über oben nach unten rechts zunehmend: Unten links ein Schwarzweißbild, rechts ein übertrieben farbiges Bild

Fotografie und Filmkunst

In der analogen Aufnahmetechnik kann der Fotograf zum Zeitpunkt der Aufnahme nur begrenzt in die Farbsättigung eingreifen; Hilfsmittel sind hier optische Filter, wie Skylight- oder Polfilter. In der digitalen Aufnahmetechnik kann die Farbsättigung dagegen bereits zum Zeitpunkt der Aufnahme variiert werden. Eine farbneutrale Aufnahme erhält man nur im Rohdatenformat, während die Kameraelektronik sonst ausnahmslos bereits eine Bildverarbeitung vornimmt.

Bildbearbeitung, Desktoppublishing und Druckwesen

Weil die drei Größen Farbton, Sättigung und Helligkeit das menschliche Farbsehen viel besser nachstellen, als etwa das in der elektronisch-optischen Darstellung maßgebliche RGB-Farbsystem oder YUV-Farbsysteme und das CMYK-Farbsystem des Druckwesens, arbeitet man in der Bildverarbeitung ausschließlich mit HSV-Systemen, um Bilder nachzubearbeiten.

Da die idealen Farbräume durch die technische Farbdarstellung (auf Bildschirmen und Monitoren, aber auch im Druck) begrenzt sind, ist im High-End-Bereich die Berücksichtigung der maximalen Farbsättigung der Darstellung unbedingt nötig (Gamut-Matching) – auch diese schwankt je nach Farbton.

- Allgemein sind gesättigte Farbtöne gar nicht und Grüntöne viel schlechter optisch-technisch darstellbar als Rot- und Blautöne (vergl. das im Eingangsbild gegebene Wide-Gamut-RGB-Dreieck, das den Sättigungsumfang eines modernen Monitors darstellt, und seine Farbabstände zum Rand des CIE-Diagramms, das die Leistungsfähigkeit des menschlichen Auges darstellt).

- Bei Monitoren hatte man lange das Problem, das die grünen und roten Leuchtmittel die blauen an *Farbigwirkung* bei Weitem übertrafen. Auf Röhrenmonitoren konnte man das durch höhere Energiedichte des Kathodenstrahls korrigieren, die Entwicklung der Flachbildschirme (LED-Bildschirme) wurde erst durch die Entwicklung der hochbrillanten Blau-LEDs in den 1990ern möglich, Rot- und Grün-LEDs gab es schon seit den 1960ern.
- Übliche Bildschirme arbeiten auf Basis des RGB-Raumes (Rot, Grün, Blau). Gelb, Türkis (Cyan) und Lila (Magenta) werden durch aktivieren zweier Pixel „ermischt“, so dass diese doppelt so *hell*, aber weniger *gesättigt* sind – das Auge (genauer das visuelle Wahrnehmungssystem) gleicht das durch die folglich höhere (visuelle) *Farbigkeit* (Farbintensität) etwas aus. Den entsprechenden Effekt im Druck, bei dem Cyan, Magenta und Gelb (CMY) die Grundfarben sind, also Rot, Grün, Blau nur ermischt werden, wird technisch durch Sechsfarbendruck oder Schmuckfarben für nötige hochgesättigte Farbtöne ausgeglichen.

Druck und Malmittel

Volltonfarben sind Farben von maximal darstellbarer Farbsättigung beziehungsweise Buntheit, sowohl im farbmtrisch absoluten Sinne, als auch im Druckwesen, wo sie als Schmuckfarbe eingesetzt werden, oder als Abtönfarbe hoher Färbekraft bei Anstrichmitteln.

Alterung

Fast alle Farbmittel altern, egal ob Farbstoffe und Pigmente durch chemische Zersetzung oder Bildschirme durch die beständige Anregung. Folglich sinkt die reine Lichtausbeute und insbesondere zunehmend wird die Sättigung geringer.

Weil Bildschirme auf additiver Farbmischung beruhen, die Farbsättigung also direkte Folge des abgestrahlten Lichts ist, sinkt nur die absolute Sättigung, nicht aber die relative zum maximalen Weiß (Farbigkeit). Alternde Bildschirme werden nur insgesamt „flau“. Wohl altern aber die drei Farbmittel der Pixel-Grundfarben unterschiedlich schnell, diese Abweichungen bleiben aber bei Handelsware unter der Lebensdauer – im kritischen gewerblichen Bereich wird aber regelmäßig nachkalibriert.

In Malerei und Druck ist die Alterung direkt von den Farbmitteln abhängig, jedes verliert seine Farbigkeit unterschiedlich. Farbmittel sind nicht nur darum umso wertvoller, je brillanter sie frisch sind^[9], sondern auch, wie lange sie halten. So wären etwa Chlorophyll (grün) oder auch das chemisch verwandte rote Hämoglobin, aber auch Zinnober hochsattete Farbmittel, sie oxidieren aber innerhalb kurzer Zeit zu Braun. Während etwa Eisenoxidpigmente fast nicht altern, aber von Natur aus wenig farbsatt sind.

In der Geschichte der Malerei war man immer auf der Suche nach brillanten *und* stabilen Pigmenten, so wurden Edelsteine pulverisiert zu Farbmitteln. Wie Lapislazuli, ein bis heute nur vereinzelt übertroffen farbsattes Pigment.^[10] Weitere wenig alternde, hochfarbsatte Farbmittel sind Blattgold und andere Schlagmetalle, die zum Gutteil hochgiftigen Pigmente, wie Schweinfurter Grün (Arsen), orangerote bleihaltige Mennige, Chromgelb und -rot (blei- und chromhaltig) sowie die roten bis gelben Cadmiumfarben.

Außerdem sind viele Farbmittel gegen andere Einflüsse, wie UV-Strahlung oder Säuren und Basen nicht resistent. Bei historischen Bildern ist eine Abschätzung der originalen Farbwirkung eigentlich nur im Fresko möglich, wo ein reduzierter Satz (Kirchenmaler-Palette) an chemisch stabilen Pigmenten verwendet werden konnte. So überrascht die Farbenpracht Michelangelos, die bei der richtungsweisenden Restaurierung der Sixtina festzustellen war. Nach etwa 150 Jahren Farbmittelentwicklung stehen mit Farbmitteln wie den Kobaltpigmente (blau bis grün), Hansagelb, Spinell- und Rutilmischphasenoxidpigmenten (grün/blau, gelb), Phthalocyaninen (blau bis grün, dem Chlorophyll und Hämoglobin verwandt) oder mit den Pyrrolpigmenten (rot) und Chinacridone (gelb, orange, rot bis magenta) eine ganze Paletten hochbrillanter und dazu auch stabiler Farbmittel zur Verfügung.^{[10] [11]}

Weblinks

- *color vision. colormaking attributes* ^[12]. In: *handprint. watercolors* ^[13]. Abgerufen am 2010 (englisch, umfassender Essay zum Thema).
- Farbsättigung der Bilder mit Gimp bearbeiten ^[14]

Einzelnachweise

- [1] Definition: Zwiesler, Farbe nach Wyszecki und Stiles (1982, S. 487) (10. Mai 2006)
- [2] Rainer Zwiesler: *Farbwahrnehmung. Physikalische und physiologische Grundlagen. Besondere Phänomene* (<http://www.farbe.com/farben11.htm>). Abgerufen: 10. Mai 2006
- [3] Zwiesler, Farbe (10. Mai 2006)
- [4] Eva Lübke: "Farbe im Kopf-Farbsysteme in der Realität," Muster-Schmidt, Gleichen Zürich 2008. ISBN 978-3-7881-4057-1.
- [5] *Coloroid-System* (<http://www.colorsystm.com/projekte/dt/!52COLD.HTM>). In: *virtual color nuseum*. echo productions, abgerufen am 15. März 2010 (englisch).
- [6] *Explanations of terms relating to the Natural Colour System: Chromaticness* (<http://www.ncscolour.co.uk/information/glossary.html#chromaticness>). In: *NCS Glossary*. NCS Colour Centre for the UK and Ireland, abgerufen am 15. März 2010 (englisch).
- [7] MacEvoy gibt eine ausführliche Definition des Begriffs. (10. Mai 2006)
- [8] the secret of glowing color (<http://www.handprint.com/HP/WCL/tech16.html#shortcuts>). *Handprint*
- [9] hue purity of watercolor paints (<http://www.handprint.com/HP/WCL/huepurity.html>). *Handprint*
- [10] Abb. *CIELAB estimates of chroma and hue purity* in colormaking attributes → optimal color stimuli (<http://www.handprint.com/HP/WCL/color3.html#optimalstimuli>). *Handprint*
- [11] the secret of glowing color → how dilution affects chroma (<http://www.handprint.com/HP/WCL/tech16.html#shortcuts>). *Handprint*
- [12] <http://www.handprint.com/HP/WCL/color3.html>
- [13] <http://www.handprint.com/HP/WCL/wcolor.html>
- [14] <http://gimps.de/gimp/bilder-fotos/farben-farbtou/>



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

⁽¹⁾ Diese Skalen sind numerisch homogen, die Schwankungen zwischen den Farbtönen liegen an den im Artikel beschriebenen Effekten

⁽²⁾ Neutralgrau eines handelsüblichen Monitorgammas

⁽³⁾ Numerisches Neutralgrau

Farbtemperatur

Die **Farbtemperatur** ist ein Maß für den Farbeindruck einer Lichtquelle.

Definition und Maßeinheit

Die Farbtemperatur ist definiert als die Temperatur eines schwarzen Körpers, eines planckschen Strahlers, die zu einer bestimmten Lichtfarbe dieser Strahlungsquelle gehört. Im Einzelnen ist es die Temperaturangabe, die bei gleicher Helligkeit und unter festgelegten Beobachtungsbedingungen der zu beschreibenden Farbe am ähnlichsten ist (Englisch: *correlated colour temperature* = *ähnlichste Farbtemperatur*)^[1].

Die Einheit der *Farbtemperatur* ist Kelvin (K). Daraus wird das Mired als das Millionenfache des Kehrwertes der Kelvin-Angabe abgeleitet.

Im CIE-Diagramm gehört zu jeder Farbtemperatur einer Lichtquelle ein Weißpunkt dieser Beleuchtungsart.

Die spektrale Verteilung des Lichts von Strahlern mit gleicher Farbtemperatur kann sehr unterschiedlich sein, sogenannte metamere Lichtquellen. Metameres Licht kann wie bei Glühlampen ein kontinuierliches Spektrum aufweisen oder sich wie bei Energiesparlampen und Flachbildschirmen auf einige schmale Spektralbänder beschränken. Der Farbwiedergabeindex gibt die Qualität der Farbwiedergabe bei Beleuchtung mit einer Lichtquelle an.

Die psychologisch bedingte Einteilung in *kalte* und *warme* Farben ist keine Beurteilung der hier beschriebenen Farbtemperatur.

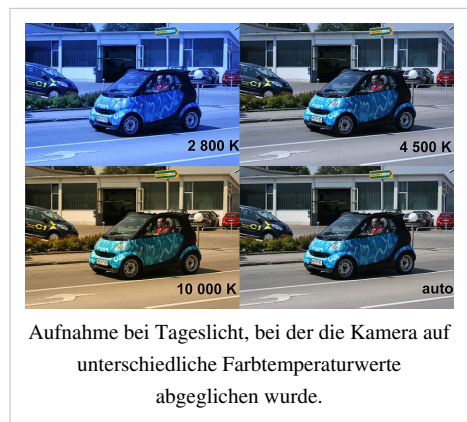
Fotografie

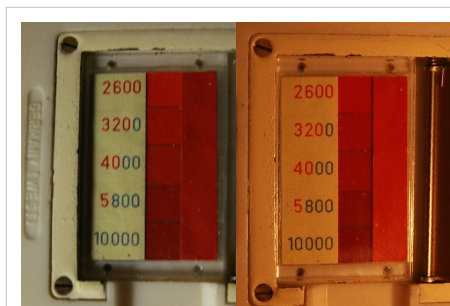
In der Fotografie ist die Berücksichtigung der Farbtemperatur wichtig, damit ein Motiv in den korrekten Farben aufgenommen werden kann, das heißt so, wie es dem natürlichen „Seheindruck“ entspricht.

Die internationale Norm für mittleres Sonnenlicht beträgt 5500 Kelvin^[2], es ist der Ton eines Sonnentages bei klarem Himmel am Vor- oder Nachmittag. Tageslichtfilme sind so sensibilisiert, dass sie bei Farbtemperaturen um 5500 K eine für das menschliche Auge korrekte Farbwiedergabe erfüllen. Kunstlichtfilme entsprechen je nach Typ einer Farbtemperatur von 3100 bis 3400 K.

Um andere Farbtemperaturen zu erreichen, werden Konversionsfilter vor das Objektiv gesetzt. In der Digitalfotografie wird ein (oft automatischer) Weißabgleich vorgenommen. Eine Nachbearbeitung unkorrekter Farben im Labor ist in gewissen Grenzen möglich, verringert aber die Qualität der Abbildung, sofern nicht mit den Rohdaten des Kamerasensors gearbeitet wird (RAW-Fotografie).

Die Wirkung eines Konversionsfilters lässt sich rechnerisch erfassen. Dafür wird die Einheit *Mired* benutzt, mit der die Wirkung eines Filters angegeben wird, negative Werte stehen für bläuliche Filter, positive für rötliche Werte. Die korrigierte Farbtemperatur erhält man, indem der Mired-Wert des Filters zur gegebenen Farbtemperatur des Lichts addiert wird. Dabei sind die Vorzeichen der Filter zu beachten.





Leuchtstofflampe - Glühlampe
Farbtemperaturmessung durch Vergleich

Zur Bestimmung der Farbtemperatur gibt es Messgeräte. In den 1950er Jahren wurde mit dem *Sixticolor* des Herstellers Gossen ein Gerät für Amateurfotografen angeboten, das ausschließlich der Messung der Farbtemperatur diente. Eine preiswertere Variante war der *Color Finder* in verschiedenen Belichtungsmessern dieser Firma. Ein Farbbalken wurde mit verschiedenen Farbfeldern verglichen, das (subjektiv) farbähnlichste Feld gab die Farbtemperatur an. Die nebenstehende Abbildung zeigt solche eine Messeinrichtung am „Sixtomat x3“ aus dem Jahre 1959, zur Verdeutlichung wurde je eine Aufnahme mit Leuchtstofflampen- und mit Glühlampenbeleuchtung zusammenkopiert.

Charakteristische Farbtemperaturen für typische Lichtquellen (nur Richtwerte)

Lichtquelle	Farbtemperatur
Kerze	1500 K
Natriumdampf Lampe (SON-T)	2000 K ¹⁾
Glühlampe (40 W)	2200 K
Glühlampe (60 W)	2680 K
Glühlampe (100 W)	2800 K
Glühlampe (200 W)	3000 K
Halogenlampe	3000 K
Fotolampe Typ B, Halogenglühlampe	3200 K
Fotolampe Typ A bzw. S, Spätabendsonne kurz vor Dämmerungsbeginn	3400 K
Leuchtstofflampe (Kaltweiß)	4000 K ¹⁾
Xenon-Lampe, Lichtbogen	4500–5000 K
Morgensonne-/Abendsonne, D50-Lampe (Druckerei)	5000 K
Vormittags-/Nachmittagssonne	5500 K
Elektronenblitzgerät	5500–5600 K
Mittagssonne, Bewölkung	5500–5800 K
Tageslichtlampe	5600–7000 K ¹⁾
Bedeckter Himmel	6500–7500 K
Nebel, starker Dunst	7500–8500 K
Blauer (wolkenloser) Himmel auf der beschatteten Nordseite, kurz nach Sonnenuntergang oder kurz vor Sonnenaufgang, <i>Blaue Stunde</i>	9000–12.000 K
Klares blaues, nördliches Himmelslicht	15.000–27.000 K

¹⁾ Gasentladungslampen haben ein diskontinuierliches Spektrum.

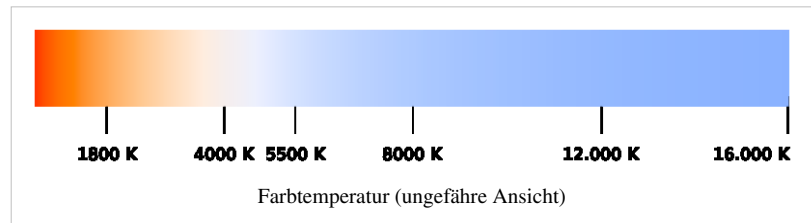
Schwierigkeiten

Künstliche Lichtquellen können Probleme bereiten. Insbesondere Leuchtstofflampen verändern je nach Alter und Beschichtung der Glasröhre ihre Farbtemperatur und Farbwiedergabeeigenschaft (Farbwiedergabeindex). Mischungen verschiedener Lichtquellen sind ebenfalls schwierig zu behandeln. Für optische Zwecke, wie etwa Proofdruck-Beurteilungen, gibt es spezielle Leuchtstofflampen mit definierter Farbtemperatur mit 5000 oder 6500 K und günstigerem Alterungsverhalten. Beim Einsatz als Lichtquelle für Fotoaufnahmen kann es unter Umständen sein, dass diese Lichtquellen keineswegs, wie es dem menschlichen Auge erscheint, ein breitbandiges weißes Licht ausstrahlen. Prinzip- und konstruktionsbedingt kann das Spektrum mehr oder weniger breite Lücken aufweisen. Korrelieren diese Lücken mit Empfindlichkeitsminima oder -maxima des Bildaufnahme-Sensors, so entstehen unerwartete Effekte.

Zum anderen lassen sich insbesondere in der Digitalfotografie Effekte mit Hilfe der Farbtemperatur und des Weißabgleichs erzielen. Unterschiedliche Farbtemperaturen ohne eine Vergleichslichtquelle lassen sich vom Subjekt (hier dem menschlichen Beobachter) nicht objektiv beurteilen. Der Gesichtssinn führt (faktisch) einen ständigen „Weißabgleich“, genannt chromatische Adaption, durch.

Spektralklassen der Sterne

Die Spektralklassen von Sternen sind nach Oberflächentemperatur untergliedert. Diese Temperatur entspricht der Strahlung eines



Schwarzen Körpers und steht damit in direktem Zusammenhang mit der Farbtemperatur. Die beiden leicht zu findenden Hauptsterne im Sternbild Orion, Beteigeuze und Rigel, lassen sich am Sternenhimmel farblich sehr gut unterscheiden. Beteigeuze ist deutlich rötlicher und gehört mit einer Oberflächentemperatur von 3.450 K in die Spektralklasse M, der bläuliche Rigel ist mit 10.500 K deutlich heißer und gehört zur Spektralklasse B.

Die Sonne hat eine Oberflächentemperatur von 5.778 K. Dies entspricht der Temperatur, die in der nebenstehenden Tabelle als die *Farbtemperatur* der Mittagssonne angegeben ist. Die Normlichtart D50, die der Beleuchtung mit einer Farbtemperatur von 5.000 K entspricht, wird an klaren Tagen am Vor- oder Nachmittag erreicht, wenn die Atmosphäre stärker dämpft.

Weblinks

- Farbtemperatur und Weißabgleich ^[3]
- Lichtanalyse ^[4] (PDF; 247 kB)

Einzelnachweise

- [1] Internationales Wörterbuch der Lichttechnik CIE/IEC – Kapitel 845
- [2] DIN 5031 T3 und DIN 5033 T7, Lichtart D55
- [3] <http://www.filmscanner.info/Farbtemperatur.html>
- [4] http://www.bs-ballasts.com/Workshop/N_Unzner/PDF/Lichtanalyse.pdf

Farbton

Der **Farbton** (englisch *hue*) ist – neben Helligkeit und Farbsättigung – eine der drei vom Menschen als grundlegend empfundenen Eigenschaften einer Farbe.

Der Farbton bezeichnet in der Farbenlehre (per Definition) die Eigenschaft, nach der man Farbempfindungen nach *rot*, *gelb* oder *grün* unterscheidet. Eine Farbe desselben Farbtons kann entweder in der Farbsättigung variieren, wie *graublau* oder in der Helligkeit, beispielsweise *rosa*.

Eine Farbe kann durch Angabe dieser drei Eigenschaften eindeutig beschrieben werden; sie spannen einen dreidimensionalen Raum auf, den sogenannten HSV-Farbraum, andere Koordinaten werden für weitere Farbräume genutzt. Durch die grundsätzliche Existenz eines Farbtons unterscheidet man die *bunten Farben* von den *unbunten Farben*: Der dem Farbton zugeordnete Farbwert wird daher auch **Buntton** genannt, und typischerweise als **Bunttonwinkel** angegeben.

Durch die Wellenlänge des monochromatischen Lichts eines Farbtons kann der Farbton nur näherungsweise beschrieben werden, für Farben der Purpurlinie wird häufig die komplementäre Wellenlänge im Farbkreis gegenüber angegeben. Für die Farbvalenz wesentlich ist nur das Verhältnis der Reizung der einzelnen Farbrezeptoren im Auge, die unter anderem auch durch eine Anpassung an die Lichtverhältnisse in der Umgebung und durch die Summe der benachbarten Farbreize im Blickfeld des Betrachters veränderlich ist.

Farben können auch über die Bestandteile gewisser Grundfarben exakt definiert werden. Bei der Additiven Farbmischung sind dies Rot, Grün und Blau (RGB), bei der Subtraktiven Farbmischung Cyan, Magenta und Gelb (Cyan, Magenta, Yellow = CMY). Für Anwendungen der Farbmeterik sind dies die theoretischen Farben X, Y und Z.

Siehe auch

- Farbwahrnehmung

Farbvalenz

Die **Farbvalenz** ist die physiologische farbige Wirkung einer Strahlung.

Die Ursache der Farbvalenz ist der Farbreiz. Die Wirkung der Farbvalenz ist die Farbwahrnehmung. Entsprechend den Graßmannschen Gesetzen ist eine Farbvalenz eine dreidimensionale Größe.

Die Rechenbeziehungen zwischen Farbvalenzen werden durch die Farbvalenzmetrik dargestellt. Das geometrische Ergebnis einer Farbvalenz ist ein Farbsystem, die definierte Farbvalenz wird darin als Farbort bezeichnet. Es können unterschiedliche Eichfarbvalenzen und verschiedene Geometrien zur Darstellung der Gesamtheit der Farborte definiert werden, darauf beruhen die verschiedenen Farbräume. Das grundlegende Farbsystem ist vereinbarungsgemäß das Normvalenzsystem, das international durch die CIE genormt ist.

Nach Helmholtz wird die Farbvalenz durch Farbton, Sättigung und Helligkeit gekennzeichnet. Im Farbsystem von Munsell sind die Koordinaten Hue, Value und Chroma, wobei die Farborte in einem Kugelkoordinatensystem beschrieben sind. Im $L^*a^*b^*$ -Farbraum wird die Farbvalenz als $\{L^*,a^*,b^*\}$ bestimmt mit Helligkeit (L^*), rot-grün-Wert (a^*), blau-gelb-Wert (b^*).

Die Farbart ist eine Teilangabe der Farbvalenz unter Verzicht auf die relative Helligkeit im geeigneten Farbraum.

Der Zusammenhang der Begriffe der Farbe/ Farbmetrik

Begriff	Wirkort	Wirkart	Fachgebiet
Farbreiz	Lichtquelle	Sichtbares Licht	Physik / Optik
Farbvalenz	Auge, insbesondere Zapfen	Wahrnehmung	Physiologie
Farbe/Farbempfindung	Gehirn	Erleben und Psyche	Psychologie

Literatur

- Manfred Richter: *Einführung in die Farbmetrik*. Walter de Gruyter, Berlin 1981.

Weblinks

- Meet iCAM: A Next-Generation Color Appearance Model* (PDF, englisch) ^[12] (343 kB)
- The CIE 1997 Interim Colour Appearance Model (Simple Version), CIECAM97s* (PDF, englisch) ^[13] (63 kB)
- Color Appearance Models: CIECAM02 and Beyond Outline* (PDF, englisch) ^[14] (2,33 MB)

Farbwahrnehmung

Die **Farbwahrnehmung** ist als Teilbereich des Sehens die Fähigkeit, eine vom Farbreiz abhängige Farbe zu erkennen. Unterschiedliche spektrale Zusammensetzungen des Farbreizes können zur gleichen Farbwahrnehmung führen, weshalb umgekehrt nicht aus der wahrgenommenen Farbe auf die Zusammensetzung des Farbreizes geschlossen werden kann. Das ist nur möglich, wenn monochromatisches Licht vorausgesetzt ist. Zur Kennzeichnung eines bestimmten monochromatischen Lichts wird deshalb neben der Wellenlänge auch dessen wahrgenommene Farbe (Spektralfarbe) benutzt.

Geschichte der Erforschung

- Isaac Newton entdeckt, dass Licht aus verschiedenen Farbanteilen zusammengesetzt ist und beschreibt das Phänomen der Metamerie (unterschiedlich zusammengesetztes Licht kann denselben Farbeindruck hervorrufen). Er prägt den Satz "The rays are not coloured" (Die Lichtstrahlen sind nicht farbig). Goethe lehnt diesen Ansatz ab, da er subjektiv „helles Gelb“ und „dunkles Blau“ sieht, als Grundlage für seine Farbenlehre.
- 1794: John Dalton berichtet über seine Farbfehlsichtigkeit. Er sah Rot nur als undeutlichen Schatten, Orange, Gelb und Grün nahm er nur als verschiedene Abstufungen von Gelb wahr (deshalb wurde die Rot-Grün-Blindheit auch als „Daltonismus“ bezeichnet.)
- 1802: Thomas Young vermutet, dass die Möglichkeit, alle Farben aus drei Primärfarben zusammenzusetzen, auf physiologischen Vorgängen in der Netzhaut beruht und postuliert drei Rezeptortypen, die zu den Primärfarben passen.
- James Clerk Maxwell identifiziert zwei Typen des „Daltonismus“ und erklärt sie mit Hilfe seiner Drei-Rezeptoren-Theorie.
- Der Psychologe Ewald Hering entwickelt seine Vierfarbentheorie als Gegenthese. Die Lösung des Widerspruchs und eine Weiterentwicklung der Sicht gelingt von Kries mit der Kries-Zonentheorie.
- John William Strutt entwickelt das Anomaloskop, mit dem die Farbtüchtigkeit getestet wird. Bei Untersuchungen entdeckt er die Rot- und die Grünschwäche.
- Mitte der 1960er Jahre entwickeln zwei Forschergruppen um Paul K. Brown und Edward McMichael jr. Mikrospektralphotometer, mit deren Hilfe die Absorption einzelner Zapfen gemessen werden kann.

Physiologie

Grundlagen

Das Wahrnehmungssystem muss mindestens zwei (beim Menschen sind es drei) unterschiedliche Typen von „Lichtrezeptoren“ haben, um unterschiedliche Zusammensetzungen des Lichts feststellen zu können.

Der Mensch besitzt zwei unterschiedliche Systeme von visuellen Rezeptoren. Stäbchen sind wesentlich empfindlicher, aber es gibt davon nur einen Typ. Diese Rezeptoren können folglich keine Farben unterscheiden. Das zweite System sind die Farbrezeptoren, die Zapfen. Davon gibt es beim Menschen drei Typen mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit. Sie sind für das Tagessehen (Photopisches Sehen) verantwortlich. Für ihre Reizantwort ist eine Leuchtdichte von mindestens $0,1 \text{ cd/cm}^2$ nötig. Unter dieser Schwelle sind nur Hell-Dunkel-Unterschiede durch die Stäbchen-Rezeptoren wahrnehmbar (skotopisches oder Nachtsehen).

Zwar ist bei der Entstehung von Farben zu unterscheiden, ob das als farbig wahrgenommene Objekt Licht abstrahlt, oder ob es Fremdlicht reflektiert, streut, beugt oder bricht. Der auftreffende Farbreiz und damit die Wahrnehmung ist allerdings davon unabhängig.

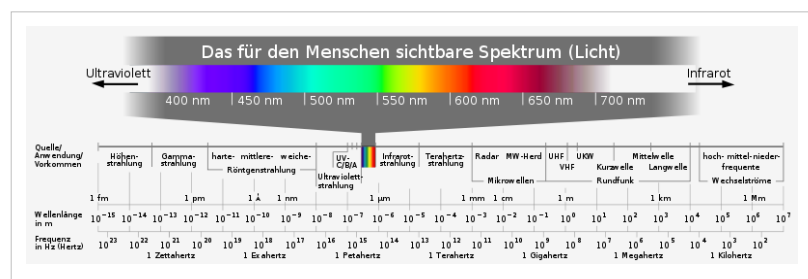
Im Alltag „kommt die Farbe“ meist von Körpern, die durch Licht mit einem kontinuierlichen Lichtspektrum beleuchtet werden. Solches „weißes Licht“ wird in der Regel von heißen Körpern mit unterschiedlichen Tönungen

ausgestrahlt, Beispiele sind die Sonne, die Kerzenflamme oder Glühlampen. Durch Entwicklungen neuerer Technik nehmen Lichtquellen zu, die gut definierte Wellenlängen aussenden, Ursache dafür sind Elektronensprünge in den Energieniveaus der Atome. Beispiele dafür sind Natriumdampflampen, LEDs und Laser. Licht kann durch Filter eingefärbt werden, Beispiele sind Farbgläser der Verkehrsampel. Brechung in Medien oder Beugung an Gitterstrukturen zerlegt Licht nach Wellenlängen mit dem Ergebnis unterschiedlicher Farben, Beispiele sind die Farben hinter einem Prisma oder schillernde CDs. Andere Ursachen sind Wellenüberlagerungen mit Interferenz an dünnen Schichten, wie bei "Öllachen". Körper absorbieren aus auftreffendem „weißem Licht“ einige Wellenlängen, das rückgestrahlte remittierte Licht ist sodann wegen des veränderten Spektrums farbig, hier sind als Beispiele rotes Blut und grüne Blätter zu nennen.

Farbreize von unterschiedlicher spektraler Zusammensetzung des Lichts können zum selben Farbeindruck (Farbvalenz) führen. Das Rot der Verkehrsampel entsteht durch einen Glasfilter, der nur das Glühlampenlicht mit Wellenlängen rund um 650 nm durchlässt. Das Rot eines Glanzkäfers oder Kolibris kann durch Interferenz des Sonnenlichtes entstehen, indem hier bestimmte, von der Schichtdicke abhängige Wellenlängen verstärkt, andere ausgelöscht werden. Die unterschiedliche Entstehungsmöglichkeit des gleichen Farbeindrucks bezeichnet man als Metamerie.

Sichtbares Licht

Für Menschen ist die elektromagnetische Strahlung des Lichtspektrums im Wellenlängenbereich von 380 bis 780 nm sichtbar. Unter seltenen Umständen kann das spektrale Sehen etwa nach einem chirurgischen Eingriff am Auge kurzweilig bis 300 nm oder langweilig bis 820 nm reichen.

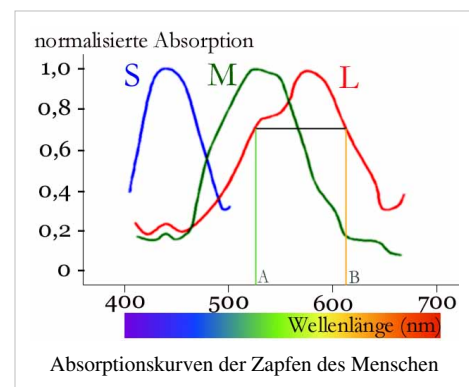


Die Sehzellen

Photonen können in den Sehzellen (Photorezeptoren) eine Verformung am Proteid des Sehpurpurs bewirken und durch anschließende biochemische Vorgänge elektrische Signale (Rezeptorpotentiale) auslösen. Über die Sehnerven, die in der Netzhaut beginnen, werden diese Signale ins Zentralnervensystem geleitet und zu einem Farbeindruck verarbeitet.

Es gibt zwei Systeme von Photorezeptoren beim Menschen.

- In einem System existieren *Stäbchen*, die ausschließlich auf Hell-Dunkel-Kontraste reagieren. Sie sind auch noch bei geringer Lichtintensität unter 0,1 cd/cm² aktiv und somit für das *Nachtsehen* verantwortlich.
- In einem getrennten System sind drei verschiedene Arten von *Zapfen* (Farbrezeptoren) vorhanden. Sie registrieren die spektrale Farbvalenz. Jede Art dieser Zapfen hat eine spezifische spektrale Empfindlichkeit.
 - L-Zapfen (L für Long) sind für längere Wellenlängen empfindlich. Das Absorptionsmaximum liegt etwa bei 560 nm, was einem grünlichen Gelb entspricht.
 - M-Zapfen (M für Medium) sind empfindlich für mittlere Wellenlängen. Das Absorptionsmaximum liegt hier bei etwa 530 nm, entsprechend einem Gelbgrün.
 - S-Zapfen (S für Short) sind für kürzere Wellenlängen empfindlich. Das Absorptionsmaximum liegt etwa bei 420 nm, einem Blau. S-Zapfen sind beim Menschen nur mit einem Anteil von 12 Prozent aller Zapfen



vertreten.

Zapfen unterscheiden keine Wellenlängen direkt. Das Absorptionsspektrum der Zapfen gibt lediglich die Wahrscheinlichkeit an, mit der Licht einer bestimmten Wellenlänge ein Aktionspotential auslöst. Ein Aktionspotential kann von einem Photon mit der Wellenlänge A ausgelöst worden sein, aber auch von einem Photon mit der Wellenlänge B. Um also Farben zu unterscheiden, muss das Gehirn die Antworten von mindestens zwei verschiedenen Zapfentypen vergleichen. Je mehr Zapfentypen vorhanden sind, desto größer sind die Unterscheidungsmöglichkeiten. Dieses *Prinzip der Univarianz* stammt von Rushton (1972).

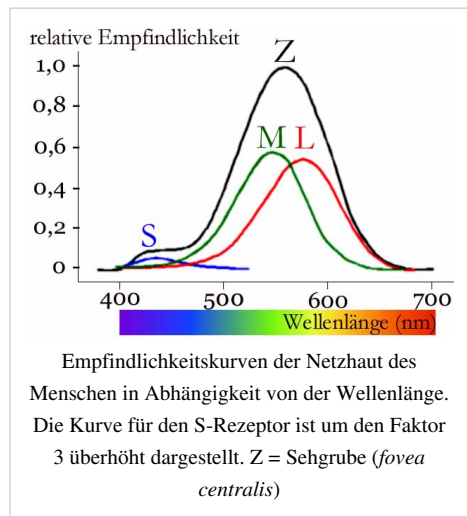
Lichtempfindliche Rezeptoren existieren nicht nur bei Primaten, wie dem Menschen, sondern auch bei vielen verschiedenen Tierarten aus ganz unterschiedlichen Verwandtschaftsgruppen (Wirbeltiere, Gliedertiere, Weichtiere).

Absorptionsmaxima verschiedener Rezeptortypen im Vergleich

Zapfentypen:	UV	S	M	L	Stäbchen
Mensch [1]	-	424 nm	530 nm	560 nm	*
Mensch [2]	-	420 nm	535 nm	565 nm	*
Mensch [3]	-	420 nm	530 nm	560 nm	500 nm
Rhesusaffe [4]	-	*	540 nm	565 nm	505 nm
Pferd	-	428 nm	539 nm	-	
Vögel [1]	370 nm	445 nm	508 nm	565 nm	
Goldfisch (<i>Carassius aureatus</i>) [5]	356 nm	447 nm	537 nm	623 nm	

Anmerkung:

- Absorption wird hier als Anzahl der von einem Zapfen pro Sekunde aufgenommenen Photonen bestimmt.
- Die genannten Absorptionsmaxima sind nur Richtwerte; Unterschiede gibt es nicht nur zwischen den Arten, sondern auch von Individuum zu Individuum.



Die Zapfendichte ist ungefähr in der Netzhautmitte als dem *Punkt des schärfsten Sehens*, Fovea centralis, am größten; am Rand des Gesichtsfeldes sind hingegen kaum noch Zapfen zu finden, dafür viele Stäbchen für die stäbchenvermittelte Nachtsicht. In der Fovea centralis gibt es dagegen keine Stäbchen, daher kann man nachts zum Beispiel schwach leuchtende Sterne nur sehen, wenn man etwas an ihnen "vorbeischaute", und dann nicht in Farbe.

Funktionen der Sehzellen

Zapfen und Stäbchen sind mit den nachfolgenden Nervenzellen der Netzhaut derart „verschaltet“, dass neben Registrierung der Farbqualität noch weitere Bearbeitungsprozesse möglich sind.

- Das schnelle Rot-Grün-System dient der Kantenverstärkung, die M- und L-Zapfen entstammen stammesgeschichtlich einem gemeinsamen Entwicklungsstand. Die Differenz von L- (Rot) und M- (Grün)signal wird mit der Summe beider verglichen. Bei Isoluminanzbedingungen unter Laborbedingungen, d. h. beide Zapfentypen werden mit rotem und grünem Licht gleicher Stärke beleuchtet, kann dies zum Verschwinden scharfer Kanten führen. (*minimally distinct border*-Phänomen).
- Das langsamere Blau-Gelb-System ist für die Farbkonstanz zuständig.
- Das Signal des Rotzapfens alleine wird vermutlich zur Bewegungsdetektion langsamer Bewegungen verwendet.

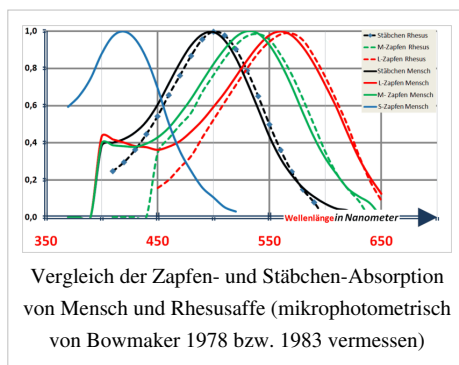
Ganglienzellen

Es gibt drei Klassen von Ganglienzellen in der Netzhaut: Hell-Dunkel-System mit On- und Off-Zentrum-Feldern (zur Erhöhung des Kontrastes – On-Zentrum: Belichtung des Zentrums ergibt Erregung, Belichtung der Peripherie ergibt Hemmung, Off-Zentrum umgekehrt), Gelb-Blau-System (Gelb löst Aktivierung des Zentrums und Hemmung der Peripherie, Blau umgekehrt), Rot-Grün-System (Rot Aktivierung des Zentrums, Hemmung der Peripherie, Grün umgekehrt)

Die Umrechnung von Drei- auf Vierfarben-System erfolgt durch Subtraktion und Addition der Rezeptor-Information.

Farbe

Farbreiz, Farbvalenz und Farbeindruck



Der Zusammenhang der Begriffe der Farbe/ Farbmatrik

Begriff	Wirkort	Wirkart	Fachgebiet
Farbreiz	Lichtquelle	Sichtbares Licht (380 nm bis 780 nm)	Entstehung von Farben / Optik
Farbvalenz	Auge, insbesondere Zapfen	Farbwahrnehmung	Physiologie
Farbe/Farbempfindung	Gehirn	Erleben und Psyche	Psychologie

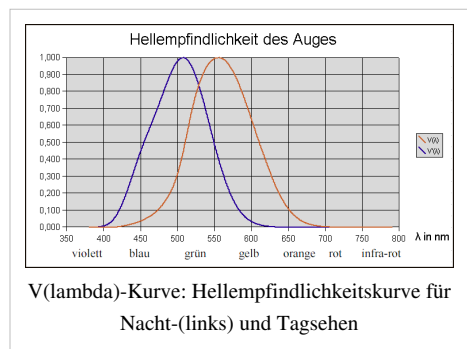
- Der Farbreiz ist die Strahlungsleistung, die in den Zapfen der Netzhaut des Auges absorbiert wird. Er ist die physikalische Ursache von Farbvalenz und Farbempfindung.

- Die Farbvalenz ist die physiologische farbliche Wirkung einer Strahlung. Sie ist charakterisiert durch die Erregungszustände der drei Zapfenarten des menschlichen Auges, die vom (physikalischen) Farbreiz abhängig sind.
- Die Farbpfindung entsteht durch Zusammenwirken der (auftreffenden) „mittleren“ Gesamthelligkeit und der Farbkonstanzleistungen des Gehirns. Das *trichromatische Sehen* - die Reizantwort der drei Zapfenarten - erreicht nicht das Bewusstsein. Entlang der Erregungsleitung von den Sehzellen zum wahrnehmenden Großhirn werden - wahrscheinlich im Corpus geniculatum laterale - die Parameterpaare Schwarz/Weiß (Hellwert), Rot/Grün, Blau/Gelb (zwei konträre Buntpaare) geformt. Beleg dafür ist auch, dass empfindungsgemäßer dreidimensionaler Farbraum der menschlichen Farbwahrnehmung näher kommt als ein direkter „Zapfenraum“. Das Zusammenspiel von „Hell“ und „Bunt“ lässt sich durch den Purkinje-Effekt oder den Pulfrich-Effekt überprüfen.
- Eine Spektralfarbe ist der enggefasste, monochromatische Farbreiz einer Strahlung. Monochromatische Strahlung kann von einem Emissionsstrahler (wie einer Natriumdampflampe) ausgehen. Ein solcher Farbreiz kann aber auch von einem Monochromator oder einem Interferenzfilter erzeugt werden. Zu jeder monochromatischen Strahlung im sichtbaren Bereich gehört eine bestimmte Farbpfindung. Farben, die durch monochromatische Strahlung entstehen, heißen Spektralfarben. Die "Monochromasie" der Spektralfarbe wird durch die Breite des Wellenlängenbereiches - die spektrale Bandbreite - angegeben.

Farbe und Helligkeit

Erst ab einer bestimmten Helligkeit ist die aus drei Komponenten gebildete *Farbenwelt* gegeben, das trichromatische Sehen mit den Zapfen, die jeweils unterschiedliche Opsine enthalten (dieser Helligkeitsbereich wird in der $V(\lambda)$ -Kurve dargestellt). Diese drei Zapfentypen, deren Erregungen die Farbvalenz der einfallenden Strahlung als untrennbare Gesamtwirkung der drei Einzelerregungen liefern, haben unterschiedliche *spektrale Empfindlichkeitskurven* beim durchschnittlichen farbnormalsichtigen Beobachter. Normiert auf gleiche Gesamtflächen der drei Kurvenzüge ergeben sich die *Normspektralwertfunktionen*. Wenn also jeder Rezeptor 1/3 der

Gesamterregung liefert, dann wird *unbunt* (weiß, grau oder schwarz) empfunden. Die Größe der Gesamterregung ($B + G + R$) ergibt die *Farbhelligkeit*. Der Farbton ist durch die relativen Erregungen b , g , r gegeben: $b = B / (B + G + R)$ usw. Da gilt: $b + g + r = 1$, braucht man nur zwei Anteile (r und g) anzugeben, um einen Farbton eindeutig zu kennzeichnen. In einer $r - g$ -Ebene ist nur ein Dreieck möglich, weil es keine negativen Erregungen gibt. Die Ecken des Dreiecks können nicht erreicht werden, weil es keinen Farbreiz gibt, der nur einen Farbrezeptor erregt. Der Spektralfarbenzug schließt sich nicht. Um den Bogen zu schließen, braucht man die Mischfarben zwischen Violett und Rot, die Purpurgerade. Im CIE-Normvalenzsystem ergibt sich die *Normfarbtafel*, die in der DIN 5033 genutzt wird.



Theorien der Farbwahrnehmung

- Drei-Farben-Theorie von Thomas Young (weiterentwickelt von Hermann von Helmholtz): Es gibt drei Sehzell-Typen für drei Farben, die als Primärfarben bezeichnet werden. Nach Helmholtz lassen sich alle anderen Farben einschließlich Weiß und Schwarz durch additive oder subtraktive Mischung aus 3 Grundfarben erzeugen, z. B. additiv aus Rot-Grün-Blau (RGB).
- Gegenfarbtheorie: Nach Ewald Hering gibt es einen Kreis von Farben mit paarweise gegenüberliegenden Gegenfarben: Rot-Blaugrün, Purpur-Grün, Blau-Orange, Violett-Gelb. Jedes Paar von Gegenfarben ergibt in subtraktiver Mischung Schwarz und in additiver Mischung Weiß.
- Kries-Zonentheorie: Johannes von Kries (er arbeitete unter Helmholtz) führte aufgrund neurophysiologischer Forschungsergebnisse beide Theorien zusammen: Auf Rezeptorebene gilt die Drei-Farben-Theorie, bei der Verarbeitung im Zwischenhirn werden die Signale aber zu Gegenfarben verrechnet.

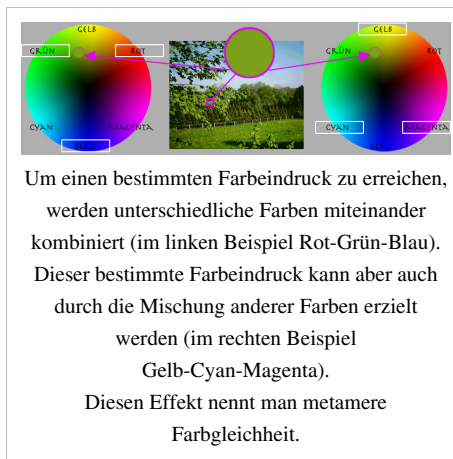
Der Zapfenerregungsraum als Farbraummodell

Unterschiedliche Sättigungen der Farben zum Weiß oder zum Schwarz hin können mit einer *zweidimensionalen Normfarbtafel* jedoch nicht berücksichtigt werden. Hierzu braucht man ein dreidimensionales Gebilde, den *Farbraum*, wie beispielsweise eine Kugel, bei der ein *Weißpol* und ein *Schwarzpol* vorhanden sind, und ein Farbkreis den Äquator bildet.

Sollen aber alle Farbtöne als gleichweit voneinander entfernt wahrgenommen werden, verändert sich diese Kugel zu einem merkwürdig geformten *Farbkörper*. Im Blau bekommt die Kugel einen Bauch – sie wird konvexer. Bei Purpur und Rot flacht die Kugel ab und bekommt bei Gelb ein weit herausstehendes „Knie“ – eine Ecke. Dieser subjektiv bestimmte Farbkörper der Wahrnehmung deckt sich mit dem möglichen, aus den Funktionen der Zapfenerregungen errechneten *Erregungsraum*.

Metamere Farbgleichheit

Jede Kombination von Farben erzeugt einen spezifischen Reiz (= eine bestimmte Farbe). Diese bestimmte Farbe kann auch durch die Kombination anderer Farben erzeugt werden (s.a. Musterbild). Dieser Effekt wird *metamere Farbgleichheit* genannt und gilt sowohl für starke Änderungen im Farbmix (komplett andere Primärfarben), als auch für geringfügige Unterschiede in der spektralen Zusammensetzung des Lichts.



Farbkonstanz

Das Farbsehen entwickelte sich in Anpassung an eine wechselnde, von Tages- und Jahreszeit abhängige Farbqualität der Beleuchtung. Morgens und abends gelangt auf die Erde eher langwelliges (rotes) Licht, mittags eher kurzwelliges (blaues).

Auf Grund des angeborenen Systems der Farbkonstanz wird die Objektfarbe trotz unterschiedlicher Beleuchtung als nahezu unverändert wahrgenommen. Ohne dieses System würde eine rote Kirsche morgens eher weiß und mittags eher schwarz aussehen, eine unreife grüne Kirsche morgens schwarz und mittags weiß.

Ein einfaches Experiment hierzu kann man leicht eingehen, wenn man sich nachts ein vom Grün oder Rot einer Verkehrsampel beleuchtetes Schild 250 (Verbot für Fahrzeuge aller Art) ansieht und dabei aufmerksam den roten Ring am runden Rand betrachtet.

In der Fotografie kann man diese Unterschiede durch Aufnahmen mit Kunstlichtfilmen bei Tag oder Tageslichtfilmen bei Kunstlicht nachvollziehen.

UV-Wahrnehmung beim Menschen

Das Rhodopsin der menschlichen Stäbchen hat zwei Absorptionsmaxima. Im sichtbaren Bereich bei 500 nm (*türkis*) reagiert der Rezeptor auf „Hell“, hinzu kommt ein Nebenmaximum im UV-Bereich bei 350 nm. Das gesunde menschliche Auge verhindert einen Reiz durch die Absorption von UV-Licht in der Augenlinse. Dies ist auch Schutzfunktion für die Netzhaut, die durch die energiereiche UV-Strahlung geschädigt wird. Menschen, denen die Linse entfernt wurde (Grauer Star) können allerdings UV-Licht wahrnehmen, ohne dies als *Farbe* zu sehen.^[6]

Zäpfchen werden geschädigt und nehmen so keinen unterschiedlichen Farbreiz wahr. Die spektrale Empfindlichkeit am kurzwelligen Ende wird zu kürzeren Wellenlängen verschoben, die Intensität der Wahrnehmung steigt nicht.

Defekte der Farbwahrnehmung

Farbfehlsichtigkeit tritt in verschiedenen Formen auf:

- Rotblinde ohne Rotrezeptoren werden als Protanope (gr. *protos*, erster; gr. *an-*, nicht; gr. *ope* Blick) bezeichnet
- Grünblinde als Deutanope (gr. *deuteros*, zweiter), sie weisen beide das Phänomen der Dichromasie auf, besitzen also nur zwei statt drei Zapfentypen.
- Rotschwäche (Protanopie) und Grünschwäche (Deutanopie) beruhen auf veränderten Empfindlichkeiten der entsprechenden Rezeptoren.

Diese Fehlsichtigkeiten treten bei Veränderungen der Opsin-Gene auf. Aber auch Linsenverfärbungen (Vergilbungen) können die Farbwahrnehmung beeinträchtigen.

Imaginäre Farbe

Wie der Name vermuten lässt, sind dies nichtexistente, un reale Farben. Im LMS-Farbraum der Zapfen lassen sich alle wahrnehmbaren Farben beschreiben. Die Messungen in Vorbereitung des CIE-Systems und spätere mikrospektralfotometrische Bestimmungen am Auge haben objektiv nur die realen Farben bestimmen können. Prinzipiell können im dreidimensionalen Farbraum beliebige Primärvalenzen als Koordinaten genutzt werden, es ergibt sich eine ebenso große Vielzahl an Farbräumen. Dieser Raum kann allerdings größer sein als es einer Transformation des Zapfenraumes entspricht. Die „außerhalb“ liegenden und deshalb nicht-wahrnehmbaren Farbkonstrukte werden als imaginäre Farben bezeichnet. Um solche Farborte messtechnisch zu erreichen, wird bei Messungen im Farbvergleich nicht am „Ist“-Licht, sondern (faktisch als Subtraktion) am „Soll“-Licht geändert: äußere Farbmischung.

Farbwahrnehmung im Tierreich

„Farbig“ sehen

Farbe oder besser das „Farbigsehen“ ist ein Ergebnis der Nerventätigkeit, ein Konstrukt des Gehirns. Tiere haben nicht zwangsläufig eine Farbvorstellung wie der Mensch. »Farbe im hier behandelten Sinne« ist das Wahrnehmen unterschiedlicher Reize bei Licht unterschiedlicher Wellenlänge. Die Wahrnehmungen der Tierarten unterscheiden sich dabei beachtlich. Ursachen liegen in der Evolutionsgeschichte, das Sehen hat sich unabhängig voneinander mehrfach entwickelt. Die optischen Wahrnehmungsapparate besitzen mitunter sehr ähnliche Fähigkeiten.

Es gibt Unterschiede hinsichtlich der Anzahl der verschiedenen Rezeptortypen und der Reize der Wellenlängen. Bei den Wirbeltieren verfügen die meisten Säugetiere über zwei verschiedene Rezeptortypen, der Mensch und einige Primaten über drei, Reptilien und die in der Evolution aus diesen folgenden Vögel verfügen oft über vier farbunterscheidende Rezeptortypen.^[1] Viele Wahrnehmungsapparate reagieren auf den Wellenlängenbereich des Lichtes, der auch für den Menschen sichtbar ist, einige werden auch von Licht aus dem ultravioletten oder infraroten Bereich gereizt.

Eine Aussage über den subjektiven Farbeindruck der Tiere (oder anderer Menschen) ist bisher nicht möglich. Experimentell nachweisbar ist die Reaktion auf Reize verschiedener Wellenlängenbereiche.

Untersuchungsmethoden

Der Nachweis von Farbwahrnehmung im Tierreich setzt die Fähigkeit des Lernens voraus. Es ist deshalb nicht ganz klar, ob das nur schwach entwickelte Farbsehen der nicht-staatenbildenden Insekten, etwa bei *Drosophila*, eine Folge der Lernschwäche oder eine Schwäche des Sehsystems ist.

Möglich wäre auch, dass komplexe Verrechnung der Farbinformation unabhängig von der Helligkeit für einige Nachttiere in der Evolution keinen Vorteil bot und sich deshalb nicht durchsetzen konnte. Das würde erklären, warum Hauskatzen, die sehr gut lernen und mehrere Zapfentypen besitzen, fast nicht auf Farben zu dressieren sind: zur Jagdzeit bei der Nacht ist für die Katze Grau wichtiger.

Auch bei nachtaktiven Wirbeltieren bleiben immer zusätzlich zu den Stäbchen zwei verschiedene Zapfensysteme erhalten. Die Stäbchen für das skotopische (Nacht-)Sehen alleine könnten vom Tageslicht geblendet werden, somit könnte das entsprechende Tier tagsüber, im photopischen (Tages-)Sehen) nahezu blind sein. Für das Bewegungssehen im Wirbeltiergehirn werden die Zapfen mit dem langwelligsten Absorptionsmaximum ausgewertet, was zu einem Evolutionsvorteil führt wenn schnelle Bewegungen auszuwerten sind. Die Helligkeitskonstanz setzt ebenfalls zwei Wahrnehmungsrezeptoren voraus. Um eine Helligkeitskonstanz auch bei wechselnden Beleuchtungsbedingungen zu ermöglichen, sind stets zwei Zapfensysteme notwendig.

Tiergattungen

Gliederfüßer

- Bei Insekten wurde das Farbsehen insbesondere bei der Honigbiene untersucht. Karl von Frisch hat gezeigt, dass man Bienen nach ihren Farbempfindungen „fragen“ kann, indem man sie auf farbige Plättchen mit Futterbelohnung dressiert. Für den Nachweis echten Farbsehens reicht es dabei nicht aus, dass ein Tier immer wieder auf die einmal als futterträchtig erfahrene Farbe zurückkehrt, denn es könnte ja die Graustufe gelernt haben. Der Sinnesreiz *Farbe* wird nur dann erkannt, wenn sie *unabhängig von der Helligkeit* immer wieder gewählt wird. Frisch prüfte dies, indem er den Bienen Farbplättchen verschiedener Helligkeit der belohnten Farbe in Konkurrenz mit anderen Farben zur Auswahl anbot, und feststellte, dass die Farbe bei der Entscheidung Priorität hat.
- Der Fangschreckenkrebs *Neogondodactylus oerstedii* besitzt 8 verschiedene Rezeptortypen im sichtbaren und vier im Ultraviolett-Bereich^[7]

Niedere Wirbeltiere

Niedere Wirbeltiere und unter den Säugetieren die Beuteltiere verfügen meist über vier Zapfentypen, sie werden daher Tetrachromaten genannt. Neben den L-, M- und S-Zapfen verfügen sie über einen Ultraviolett-Zapfen, der im Bereich von weniger als 380 nm absorbiert. Da man dieses – im Vergleich zum Menschen komplexere – tetrachromatische Farbsystem bei Beuteltieren, Vögeln und Fischen findet, geht man davon aus, dass es den ursprünglichen Typus des Wirbeltier-Sehsystems darstellt.

Knochenfische

In Anpassung an die unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnisse ihrer Lebensräume haben die verschiedenen Arten der Knochenfische unterschiedliche Systeme ausgebildet. Die meisten bisher darauf untersuchten Fische sind Tetrachromaten. Die Zahl der Zapfen und deren Absorptionsmaxima hängt dabei von ihrer Lebensweise ab: Mit zunehmender Tiefe in Gewässern ist auf Grund der stärkeren Absorption von lang- und kurzwelligem Licht die Beleuchtung zunehmend einfarbiger (monochromatisch). In klaren Meeren oder Seen erreicht der blaue Anteil des Lichtes Tiefen von über 60 Metern. In Süßwasserseen mit einer hohen Planktondichte herrscht in Tiefen von 25 Metern gelbgrünes Licht vor, in Schwarzwasserflüssen und Moorseen erreicht der Rotanteil des Lichtes höchstens eine Tiefe von 3 Metern. Gleichzeitig nimmt bei allen Gewässern die Intensität des Lichtes ab. So besitzen dämmerungsaktive oder in dunklen Regionen lebende Fische vorwiegend im roten absorbierende Zapfen, während tagaktive, in den oberen, lichtdurchfluteten Regionen lebende Fische mehr Blau- und Grünzapfen aufweisen.

- Stäbchenmonochromaten besitzen keine Zapfen, sie können nur bei sehr geringen Lichtintensitäten und nur Graustufen sehen. Das hellste Grau liefern Objekte in Grüntönen.
- Dichromaten haben zusätzlich zwei verschiedene Zapfentypen. Beispiel: Gemeine Goldmakrele (*Coryphaena hippurus*).
- Trichromaten besitzen ähnlich wie der Mensch drei Zapfentypen. Beispiel: Buntbarsch (*Cichlasoma longinasus*)

Ob Di- und Trichromaten auch unterschiedliche Farben wahrnehmen und unterscheiden können, hängt von der weiteren neuronalen Verarbeitung in Netzhaut und Gehirn ab.^[5]

Vögel

Hühner besitzen neben dem Rhodopsin der Stäbchen vier Zapfepigmente für Rot (Absorptionsmaximum bei ca. 570 nm), Grün (ca. 510 nm), Blau (ca. 450 nm) und Violett (ca. 420 nm). Zusätzlich befindet sich im Pinealorgan (Zirbeldrüse/Epiphyse) ein weiteres Pigment, das Pinopsin (ca. 460 nm).^[8]

Vögel und ebenso die Reptilien haben in ihren Zapfen mit Carotinoiden gefärbte und farblose Öltröpfchen, die wie ein Farbfilter funktionieren. Diese Filter engen die Absorptionsspektren der Zapfentypen ein und verbessern damit die Unterscheidbarkeit verschiedener Farben. Säugetiere, somit auch der Mensch, besitzen diese Farbfilter nicht.

Säuger

- Mäuse haben neben dem Stäbchenpigment Rhodopsin nur zwei Zapfepigmente für Grün (Absorptionsmaximum ca. 510 nm) und Blau (ca. 350 nm). Dass Hunde keinen Farbsinn haben, sie also Schwarz-Weiß sehen, wird selbst in populärwissenschaftlichen Beiträgen noch immer behauptet^[9]. Doch auch der Haushund verfügt über zwei Zapfenarten mit Empfindlichkeiten im grünen und blauen Spektralbereich.
- Primaten können „farbig“ sehen. Wie Untersuchungen an Affen am japanischen Nationalen Forschungsinstitut in Tsukuba ergaben^[10] ist die Fähigkeit, Farbtöne unabhängig von der Helligkeit wahrzunehmen, nicht angeboren. Dies stellte man bei Affen fest, die in monochromatischem Licht aufgewachsen waren. Sie konnten ein farbiges Objekt immer dann nicht wiedererkennen, wenn dies bei abweichenden Beleuchtungsverhältnissen Licht unterschiedlicher Wellenlänge reflektierte.

Tetrachromasie

Viele Insekten, Vögel, Eidechsen, Schildkröten und Fische haben Rezeptoren in ihrer Netzhaut, die auch bei Licht kürzer als 400 nm - also durch Ultraviolett - gereizt werden.^[1]

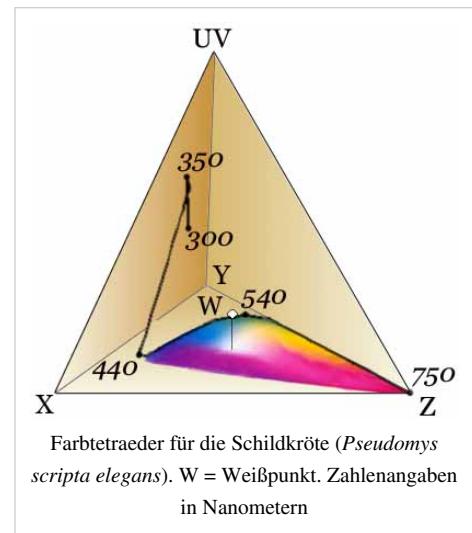
Geschichte

- Sir John Lubbock, ein Freund und Nachbar von Charles Darwin, stellte vor 1882 fest, dass Ameisen unter Ultraviolett (UV) ihre Puppen aufnehmen und aus dem Strahlungsbereich tragen.
- Karl von Frisch stellte in den 1950er Jahren fest, dass Bienen und Ameisen UV-Licht als Farbe wahrnehmen.

Ultraviolett-Wahrnehmung

Auf Grund des vierten Zapfentyps, der im Ultraviolett (UV) sein Absorptionsmaximum hat, können tetrachromatische Tiere wie einige Insekten, nahezu alle Fische (Goldfisch), Reptilien, die Ursäuger Australiens und Vögel mehr Farben unterscheiden als der Mensch. Untersuchungen am Wellensittich (*Melapsittacus undulatus*) ergaben, dass der Vogel nicht nur die Farben, die auch der Mensch unterscheidet, wahrnehmen kann, sondern darüber hinaus auch Mischungen mit unterschiedlichem UV-Anteil. So unterscheidet ein Vogel je nach UV-Anteil zum Beispiel bei einem bestimmten Blau verschiedene Farben, wo der Mensch nur eine einzige wahrnehmen kann.

Aus der Anzahl der Zapfentypen kann jedoch nicht unmittelbar geschlossen werden, dass Tiere auch die entsprechende Anzahl von Farben unterscheiden können. Dies hängt von der Weiterverarbeitung der Farbinformation in Netzhaut und Gehirn ab und kann erst durch Verhaltensexperimente untersucht werden.



Bedeutung

- Die Fähigkeit, Ultraviolett wahrnehmen zu können, spielt für einige Vögel bei der Balz eine Rolle
 - Messungen der UV-Reflexion ergaben, dass von 139 Arten, bei denen sich Männchen und Weibchen für das menschliche Auge nicht unterscheiden lassen, sich bei mehr als 90 % der Arten die Geschlechter im UV-Muster unterscheiden.^[11]
 - Bei Männchen 108 australischer Vogelarten reflektieren diejenigen Stellen des Gefieders, die bei der Balz eine Rolle spielen, mehr UV als andere Gefiederareale.^[12]
 - Bei der Blaumeise (*Parus caeruleus*) wählen die Weibchen bevorzugt diejenigen Männchen, die am meisten UV reflektieren. Da die Reflexion des UV von der Mikrostruktur der Federn abhängt, kann sie Auskunft über die Gesundheit der Männchen geben.
 - Beim Azurbischof (*Guiraca caerulea*) besetzen die Männchen mit der höchsten UV-Reflexion die größten und ertragreichsten Reviere und füttern ihre Jungen am häufigsten.^[13]

Aber auch beim Nahrungserwerb spielt die Wahrnehmung von Ultraviolett oder dessen Wirkungen eine Rolle.

- Die Oberfläche von vielen Früchten reflektiert Ultraviolett. Dadurch ist es für Tiere mit dem Vermögen, Ultraviolett wahrzunehmen, leichter, diese aufzufinden.^[14]
- Turmfalken (*Falco tinnunculus*) entdecken die Spur ihrer Beute (Wühlmaus *Microtus agrestis*) anhand deren Markierungen, da Urin und Kot Ultraviolett reflektieren.^[15]

Anders als andere Pflanzen oder die Blätter, fluoreszieren reife gelbe Bananen im Ultraviolett blau. Das könnte ein Hinweis sein, dass bananenfressende Tiere so die Reife feststellen können.^[16]

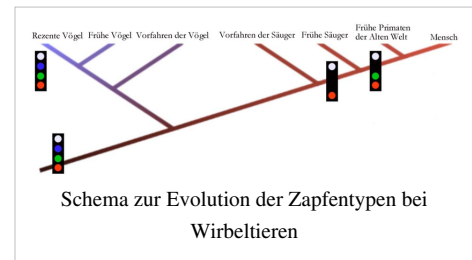
Evolution der Zapfentypen

Chromosomeneinfluss

Beim Menschen sind Männer häufiger rot-grün-blind als Frauen, da das Gen für den entsprechenden Zapfen auf dem X-Chromosom codiert ist, von dem Frauen zwei haben, Männer aber nur eins. Falls ein Gendefekt auf einem X-Chromosom vorliegt, kann daher bei Frauen in der Regel trotzdem noch ein funktionierendes Genprodukt hergestellt werden, da noch ein intaktes Gen auf dem anderen X-Chromosom vorhanden ist, bei Männern jedoch nicht.

Umwelteinfluss

Vögel besitzen vier Zapfentypen, deren Absorptionsmaxima bei 370 nm (UV-Typ), 445 nm (S-Typ), 508 nm (M-Typ) und 565 nm (L-Typ) liegen. Auf Grund von Vergleichen der DNS-Sequenzen verschiedener Opsin-Typen bei verschiedenen rezenten Tieren nimmt man an, dass auch die gemeinsamen Vorfahren der Vögel und Säuger vier Zapfentypen besaßen. In einer frühen Phase der Säugerevolution gingen die mittleren S- und M-Typen verloren. Es wird angenommen, dass diese Tiere nachtaktiv waren und deswegen diese Veränderung im Sehsystem tolerieren konnten. Vor ungefähr 40 Millionen Jahren entstand mit dem Übergang zur Tagaktivität bei den Vorfahren der Primaten der Alten Welt durch Genduplikation ein dritter Zapfentyp, so dass wieder ein M-Typ (530 nm) zur Verfügung stand, dessen Absorptionsmaximum sich aber nur wenig vom L-Typ (560 nm) unterscheidet. Ein selektiver Vorteil bestand möglicherweise darin, dass sich mit drei Zapfentypen Früchte als Nahrungsquelle besser unterscheiden lassen als mit zwei.^[1]



Kulturgeschichte

Zwar sind die neuronalen Wege und Mechanismen der Verarbeitung von Farbinformationen beim Menschen im Prinzip bekannt, wie aber das Gehirn die Aktivität der Neuronen in ein mentales Bild „übersetzt“, also letztlich der Prozess des Bewusstwerdens von Farbe, ist nicht bekannt. „Offenbar ist es nicht die primäre entwicklungsgeschichtliche Aufgabe des Sehsinnes, ästhetische Empfindungen hervorzubringen. Vielmehr scheint es seine wichtigste Aufgabe zu sein, dem Individuum durch sichere Orientierung und durch optimales Erkennen das Überleben zu gewährleisten. Deshalb hat sich der Sehsinn so herausgebildet, dass er sich an die Beleuchtungsumstände weitestgehend anpassen kann.“ (Harald Küppers^[17]) Hinweise, dass auf dieser Stufe der Wahrnehmung kulturelle und damit durch Lernprozesse beeinflusste Unterschiede bestehen, gibt die Benennung von Farben und die Einteilung des Farbspektrums in Farbgruppen.

Farbnamen und Farbsystem

- Empedokles fasst Weiß und Schwarz als Farben auf.
- Aristoteles setzt in seinem Werk *De sensu* („Über die Sinne“) die Helligkeit der Luft der Farbe Weiß von Körpern gleich, Dunkelheit entspricht der Farbe Schwarz. Die Farben setzen sich aus unterschiedlichen Mischungen von Weiß und Schwarz zusammen.

Nach diesen Vorstellungen wurden die Farben bis ins 17. Jahrhundert nach einer Helligkeitsskala angeordnet: Weiß – Gelb – Rot – Blau – Schwarz. Während heutzutage eine Farbe durch Farbton, Sättigung und Helligkeit definiert ist, sah man den Farbton bis dahin nur als Folge von Helligkeit an.^[18]

Diese Sichtweise spiegelt sich auch in der Etymologie der Farbnamen wider: So gehen die Begriffe Weiß und Gelb auf eine gemeinsame indogermanische sprachliche Wurzel mit der Bedeutung ›hell, blank, glänzend‹ (fr: *blanc*, it: *bianca* =Weiß) zurück.

Sehen und Hören

Visuell wird die Vielfalt der Welt durch eine „Rezeptorenfläche“ aufgenommen. Die Besonderheit des Farbensehens besteht darin, dass in einem engbegrenzten Bereich der Netzhaut durch die Zapfen der *Farbreiz* aufgenommen wird. Beim Hörsinn wird an zwei (gegenüberliegenden) Stellen jede Frequenz durch einen eigenen Rezeptor wahrgenommen. Die spektrale, also visuelle, Vielfalt der Außenwelt wird auf drei Reizgrößen abgebildet. Andere Lebewesen haben andere visuelle Systeme, aber der Mensch nimmt metamere Reize als gleich wahr, dadurch ist eine Farbnachstellung, das Nachbilden einer Farbe durch andere Bedingungen, überhaupt erst möglich. Musikinstrumente lassen sich dagegen auf Grund etwa von Obertönen deutlich unterscheiden.

Die Illusion einer farbigen Welt

Sobald man das Bewusstsein des Menschen in Gegensatz zu seiner materiellen Basis, also dem Gehirn und der objektiven Umwelt setzt, wird Farbe zu einem eigenständigen Objekt. Als solches „Objekt Farbe“ existiert es in der Umgebung nicht.

„Die Farben sind vom Gehirn generierte Erlebnisqualitäten bloßer elektromagnetischer Strahlung in einer absolut farblosen Welt.“

– Eckart Voland^[19] [20]

“Rays are not colored”

„(Licht-)Strahlen sind nicht gefärbt“

– Newton^[21]

Der Hirnforscher Gerhard Roth vertritt die Auffassung, dass die erlebte ›Wirklichkeit‹ unserer Welt (einschl. Farben und Musik) nur die durch unser Gehirn interpretierte Realität ist.^[22]

Die Philosophie des Geistes und die Neurowissenschaften widmen sich dem Zustandekommen des qualitativen Charakters der Farbwahrnehmung.

Aus Sicht der Physik gibt es elektromagnetische Wellen unterschiedlicher Wellenlänge und damit unterschiedlichen Energieinhalts. Dieser Farbreiz ruft in unterschiedlichen Sinneszellen Wechselwirkungen hervor. Dadurch entsteht ursächlich in den Sinneszellen und weitergeleitet im Zentralnervensystem ein unterschiedlicher Wert der Reaktionstiefe, die Farbvalenz. Farbe wird wahrnehmbar, ein objektiv feststellbarer Zustand. In einer langen Entwicklung ist ein System für die visuelle Betrachtung der Umwelt entstanden. Die Wahrnehmung von Farben erlaubt die Orientierung und Bewegung in der Welt. Es können Gefahren oder Annehmlichkeiten erkannt werden. Die Umwelt überträgt in den Lichtstrahlen eine Information. Farbe ist eine Übersetzung dieser Information in der Umwelt durch das Nervensystem.

Farbkategorien

Im europäischen Kulturkreis werden die vielen unterschiedlichen Farbnuancen einigen wenigen Farbkategorien zugeordnet: Violett, Blau, Grün, Gelb, Orange, Rot, Rosa, Braun. Untersuchungen ergaben, dass die Berimos auf Papua-Neuguinea nur fünf Kategorien verwendeten (s. hierzu auch Prototypensemantik). So ordnen sie einen weiten Bereich an Farbnuancen, der von Europäern in die beiden Kategorien Grün und Blau eingeteilt wird, nur einem Begriff zu.^[23]

Siehe auch

- Ishihara-Farbtafel
- Farnsworth-Test
- Anomaloskop
- Zur Farbenlehre Naturwissenschaftliche Arbeit von Johann Wolfgang von Goethe, 1810

Weblinks

- Grundlagen zur Farbe von Karl Gegenfurtner ^[24]
- Farbwahrnehmung mit anschaulichen Bildern ^[25]
- Colour and Vision Research Labs Tabellen zu Farbe und Farbwahrnehmung, Tristimulus-Werte, ausführliche Chromatizitätswerte ^[5]
- Farbsehtests ^[26]
- Subjektivität der Farbnamen ^[11]
- – Links, Farbtests, Bilder mit Simulation verschiedener Farbfehlsichtigkeiten ^[27]
- Warum das rechte Auge Farben anders wahrnimmt als das linke ^[28]
- Bruce MacEvoy: Color Vision (en.) ^[13]
- Was wir bei Farben fühlen ^[29]
- Programme zu Farbenlehre und Farbwahrnehmung ^[8]
- Datensammlung zu CIE-Daten, online verfügbar ^[3]
- Applets zur Visualisierung der spektralen Verläufen und umfangreiche Datensammlung ^[4]



Baum und Gras ist grün - dies hier ist aber nicht Natur, sondern ein generiertes Bild auf einem technischen Gerät, bei dem die aufgenommen Wellenlängen geändert, aber der Farbeindruck dennoch ähnlich ist.

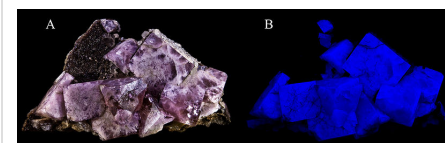
Einzelnachweise

- [1] Timothy H. Goldsmith, *Vögel sehen die Welt bunter*, in *Spektrum der Wissenschaft*, Januar 2007, S. 96-103; → Spektrum (<http://www.spektrum.de/artikel/860314>) und (PDF (http://www.wissenschaft-online.de/artikel/860255&_wis=1))
- [2] Jeremy Nathans, *Die Gene für das Farbsehen*, in *Spektrum der Wissenschaft*, April 1989, S. 68 ff.
- [3] Bowmaker & Mollon (1983): Human rods and cones, Wertetabelle bei Colour and Vision Research Labs (<http://cvrl.ucl.ac.uk/>)
- [4] Bowmaker et al, (1978): Rhesus monkey rods, Wertetabelle bei Colour and Vision Research Labs (<http://cvrl.ucl.ac.uk/>)
- [5] Palacios A.G.; Varela F.J.; Srivastava R.; Goldsmith T.H.1, Vision Research, Volume 38, Number 14, July 1998, pp. 2135-2146(12)
- [6] G.Wald: *Alleged effects of the near ultraviolet on human vision*. In: J.Opt.Soc.Amer. 42, 171-177
- [7] *Die bunte Welt der Krebse* (<http://www.wissenschaft-online.de/abo/spektrum/archiv/4724>), In *Spektrum der Wissenschaft*, Januar 2000, S. 13
- [8] Jeremy M. Berg u. a.: *Biochemie*, Spektrum akademischer Verlag Heidelberg, 5. Auflage 2003, S. 1002. ISBN 3-8274-1303-6
- [9] ZDF, 29. Januar 2009, Quiz der Tiere
- [10] In *Current Biology* Bd.14, S. 1267, 2004
- [11] Muir D. Eaton: *Human vision fails to distinguish widespread sexual dichromatism among sexually "monochromatic" birds* (<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=1182419>), In: Proc Natl Acad Sci U S A. 2005 August 2; 102(31): 10942–10946
- [12] F. Hausmann: *The evolutionary significance of ultraviolet reflectance and florescence in birds*, Honours Thesis (1997)
- F. Hausmann u. a.: *UV signals in birds are special*. In *Proc. R. Soc. Lond. B* ([http://www.bio.ic.ac.uk/research/iowens/pdf_of_papers/McNaught&Owens_2002_JEB.pdf#search="""FRanziska_hausmann"UV""](http://www.bio.ic.ac.uk/research/iowens/pdf_of_papers/McNaught&Owens_2002_JEB.pdf#search=)), 2002
- [13] Lynn Siefferman, Geoffrey Hill (Department of Biological Sciences, Auburn University, Auburn): *Journal of the Alabama Academy of Science* (<http://www.highbeam.com/Doc.aspx?DocId=1G1:79664711&tab=LIB>), 1. April 2001
- [14] Dietrich Burkhardt. In *Die Naturwissenschaften*, (April 1982) Vol. 69, No. 4, S. 153
- [15] Jussi Viitala u. a.: *Nature* 373, 425 - 427 (<http://www.nature.com/doi/finder/10.1038/373425a0>), 2. Februar 1995
- [16] Blaue Bananen (<http://www.chemie.de/news/d/88425/>)
- [17] Harald Küppers: *Harmonielehre der Farben*. DuMont, Köln 1989. ISBN 3-7701-2192-9
- [18] Georges Roque: *Licht und Farbe*. In *Spektrum der Wissenschaft – Spezial 2004*, Heft 5:Farbe, S.10 ff.
- [19] Eckart Voland: *Die Fortschrittsillusion* (<http://www.spektrum.de/voland>), In: *Spektrum der Wissenschaft* 4/07 vom April 2007

- [20] wissenschaft online (<http://www.wissenschaft-online.de/artikel/862831>)
- [21] Isaac Newton, Opticks
- [22] Gerhard Roth: *Das Gehirn und seine Wirklichkeit*. Kognitive Neurobiologie und ihre philosophischen Konsequenzen. Suhrkamp, Frankfurt 1997 ISBN 3-518-28875-X
- [23] Jules Davidoff, Debi Roberson. In *Nature*, Band 398, S. 203ff, 18. März 1999 → nature (PDF) (<http://www.icsi.berkeley.edu/~kay/tics.pdf>)
- [24] <http://www.allpsych.uni-giessen.de/karl/teach/farbe.html>
- [25] <http://www.filmscanner.info/Farbwahrnehmung.html>
- [26] <http://archiv.christoph-hoffmann.de/ESS/Semi/Farbsehtests.pdf>
- [27] <http://www.ichbinfarbenblind.de>
- [28] <http://www.wissenschaft.de/wissen/news/260387.html>
- [29] <http://www.metacolor.de/assoziationen.htm>

Fluoreszenz

Fluoreszenz ist die kurzzeitige, spontane Emission von Licht beim Übergang eines elektronisch angeregten Systems in einen Zustand niedrigerer Energie, wobei das emittierte Licht im Regelfall energieärmer ist als das vorher absorbierte. Im Gegensatz zur Phosphoreszenz sind Fluoreszenzübergänge spinerlaubt, d. h. sie gehorchen der Auswahlregel $\Delta S = 0$, erfolgen also zwischen Zuständen gleichen Spins.



Dunkelgrüne Fluorit-Zwillingskristalle (links)
unter kurzwelligem UV-Licht (rechts)

Typische *Fluorophore*, also physikalische Systeme, bei denen Fluoreszenz auftritt, sind Atome, Moleküle, Ionen und Halbleiternanopartikel.

Der Name *Fluoreszenz* ist von dem fluoreszierenden Mineral Fluorit (Flussspat, Calciumfluorid, CaF_2) abgeleitet in Analogie zur Opaleszenz zum Opal und wurde erstmals 1852 von George Gabriel Stokes beschrieben.^[1] Auch der Name des Elementes Fluor hängt mit diesem Mineral zusammen.

Phosphoreszenz/ Fluoreszenz

Sowohl Fluoreszenz als auch Phosphoreszenz sind Formen der Lumineszenz (kaltes Leuchten). Fluoreszenz ist jedoch dadurch gekennzeichnet, dass sie nach dem Ende der Bestrahlung rasch (meist innerhalb einer Millionstel Sekunde) endet. Bei der Phosphoreszenz hingegen kommt es zu einem Nachleuchten, das von Sekundenbruchteilen bis hin zu Stunden dauern kann.

Erklärung

Wird der Fluorophor optisch, also durch die Absorption eines Photons, angeregt, und deaktiviert anschließend unter Aussenden von Licht, so spricht man von Photolumineszenz. Bedingung für die Absorption von elektromagnetischer Strahlung ist die Parallelität des Übergangsdipolmoments des Moleküls mit der Schwingungsebene der elektrischen Feldkomponente des Photons. Je größer der Winkel zwischen diesen beiden, desto unwahrscheinlicher wird die Absorption und damit die Fluoreszenz.

Der angeregte Fluorophor verweilt nach der Absorption eine bestimmte Zeit im angeregten Zustand. Diese Zeit wird im Allgemeinen als Lebensdauer oder im Speziellen auch als Fluoreszenzlebensdauer bezeichnet. Da bei diesem Prozess keine Spinänderung erfolgt, ist diese Lebensdauer in der Regel recht kurz (einige Nanosekunden). Nach dem Verweilen im angeregten Zustand kann die Anregungsenergie sowohl in einem strahlenden Kanal (Fluoreszenz) als auch in einem nicht strahlenden (z. B. Schwingungsrelaxation) abgegeben werden, woraufhin anschließend der Fluorophor in seinen Grundzustand zurückkehrt.

Bei beiden Kanälen ist zu beachten, dass die Gesamtenergie, die vom System abgegeben wird, aufgrund der Energieerhaltung immer gleich der Anregungsenergie ist. Daraus ergibt sich unmittelbar die Stokessche Regel. Die besagt, dass die Wellenlänge des emittierten Photons in der Regel nie kleiner sein kann, also immer gleich groß oder größer ist als die des absorbierten Photons (längere Welle heißt weniger Energie). Im Falle von exakt gleichen Wellenlängen spricht man von Resonanzfluoreszenz, ansonsten bewirkt der durch die Schwingungsrelaxation verursachte Energieverlust eine langwellige Verschiebung der emittierten Energie (Stokesverschiebung). Die Wahrscheinlichkeit, mit der die Anregung eines Fluorophors tatsächlich zur Emission eines Fluoreszenzphotons führt, nennt man seine Quantenausbeute.

Deaktivierung

Nichtstrahlende Deaktivierungsprozesse können durch Gegenwart bestimmter Stoffe, sogenannter *Quencher* gefördert werden. Das Phänomen, dass durch diese Konkurrenzprozesse die Fluoreszenz vermindert wird, wird als Fluoreszenzlöschung (*quenching*) bezeichnet. Ein wichtiger Quencher, besonders für die Fluoreszenz organischer Fluorophore, ist Sauerstoff (O_2). Hierauf beruhen Verfahren zur Bestimmung der Stoffkonzentration von Sauerstoff in der Sensorik (Sauerstoffsensor), z. B. zur Überwachung der Sauerstoffkonzentration in der Luft. Die Abhängigkeit der Fluoreszenzquantenausbeute von der Konzentration eines Quenchers wird oft durch die Stern-Volmer-Gleichung gut beschrieben.

In einem alternativen, nicht strahlenden Prozess kann das angeregte Elektron durch ein sog. *intersystem crossing* seinen Spin zum in der Regel energetisch tiefer liegenden Triplettzustand (Ausnahme: z. B. molekularer Sauerstoff) ändern. Von hier aus sind wiederum beide Deaktivierungskanäle offen, wobei der strahlende, d. h. Licht emittierende, als Phosphoreszenz bezeichnet wird.

Anwendungsgebiete

Im Folgenden sollen einige Methoden und Anwendungsgebiete genannt werden:

Fluoreszenzspektroskopie

Der Begriff der Fluoreszenzspektroskopie fasst Methoden zusammen, die die Fluoreszenzeigenschaften von Fluorophoren ausnutzen, um Informationen über die untersuchten Systeme zu gewinnen. Es gibt viele natürliche und synthetische Verbindungen, die Fluoreszenz zeigen. Mit Hilfe der Spektroskopie lässt sich daher die Zusammensetzung einer Probe ermitteln.

→ Siehe auch: *Fluoreszenz-Korrelations-Spektroskopie, Fluoreszenzpolarisation*

Aufhellung/ Dekoration

Durch die Absorption (unsichtbaren) ultravioletten und blauen Lichts und die Aussendung längerwelligen sichtbaren Lichts lässt sich eine Aufhellung erzielen:

- Optische Aufheller
 - Signalfarbe (Tagesleuchtfarbe)
 - Textmarker (Tagesleuchtfarbe)
-

Bereits im 19. Jahrhundert wurde über die Fluoreszenz des Aesculins, bzw. sonnenlichtbestahlter, wässriger Auszüge von Rosskastanienrinde berichtet.^{[2] [3]} Diesen Effekt untersuchte der deutsche Chemiker Paul Kraus (1866–1939), indem er Wolle und Flachs mit Aesculin-haltigen Extrakten der Rosskastanie versetzte und damit eine optische Aufhellung erzielte.^[4]

In Diskotheken wird oft sogenanntes *Schwarzlicht* (UV-Licht, UV-A) benutzt, um fluoreszierende Farben, chininhaltige Getränke oder optische Aufheller in Kleidung zum Leuchten zu bringen. Bekannt sind auch Tafeln, die mit fluoreszierender Kreide beschrieben werden können. Sie können von außen oder auch von innen (Flutlicht) durch das transparente Tafelmateriale mit Ultraviolett beleuchtet sein.

Tagesleuchtfarbe fluoresziert bereits durch die Anregung mit dem Blauanteil des Tageslichtes. Da dieser bei schlechtem Wetter und in der Dämmerung besonders hoch ist, wird eine bessere Sichtbarkeit erreicht. Tagesleuchtfarbe gibt es auch in wasserlöslicher Form.

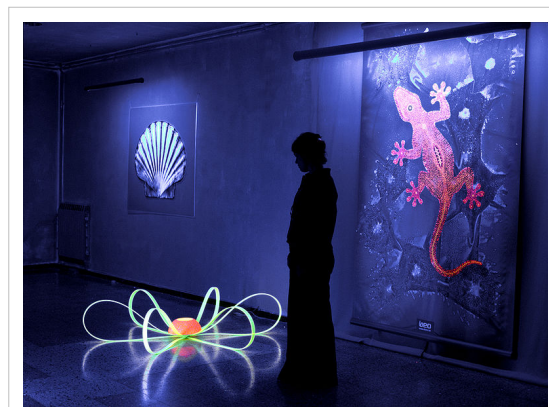
Beleuchtung

In Leuchtstofflampen wird ultraviolettes Licht, das durch Gasentladung in der mit Quecksilberdampf gefüllten Röhre erzeugt wird, in sichtbares Licht umgewandelt. In weißen Leuchtdioden (LED) wandelt ein Fluoreszenzfarbstoff das blaue Licht, das ein Halbleiterkristall erzeugt, in weißes Licht um.

Technische Fluorophore bestehen aus Stoffen wie Zinksulfid oder den Oxiden der Selten-Erd-Metalle. Werden diese Verbindungen mit so genannten Aktivatoren dotiert, lassen sich verschiedene Farben erzeugen. Als Aktivatoren werden häufig zwei- und dreiwertige Lanthanoid-Kationen verwendet. Zweiwertige Europium-Kationen erzeugen beispielsweise blaues Licht während die dreiwertigen rotes Licht emittieren. Grünes Licht entsteht beispielsweise durch Cu^+ - und Al^{3+} -dotiertes Zinksulfid.

Durch geeignete Komposition (Mischung) der Leuchtstoffe lässt sich ein großes Spektrum an nutzbaren Lichtwellenlängen und Farbtemperaturen realisieren, wodurch das Leuchtmittel auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden kann. In Leuchtstofflampen wird z. B. in Abhängigkeit vom verwendeten Leuchtgas das Spektrum des Sonnenlichtes (kaltweiß) oder das einer Glühlampe nachgeahmt.

Auch Tritiumgaslichtquellen nutzen die Fluoreszenz eines Leuchtstoffes, der durch die Betastrahlung des Tritium angeregt wird.



Kunst mit fluoreszierenden Materialien und UV-Licht.



Beispiele für Leuchtstofflampen

Anzeigen, Displays und Bildschirme

Bei Anzeigen, Displays und Bildschirmen wird oft die Anregung der Fluoreszenzfarbstoffe durch Elektronenbeschuss genutzt. Beispiele sind Vakuum-Fluoreszenz-Displays (VFD), Fernseh- und Monitor-Kathodenstrahlröhren und Oszillografenröhren (CRT), Digitrons und Abstimmanzeigeröhren.

Diesen gemeinsam ist die Freisetzung von Elektronen durch Glühemission im Vakuum und deren Beschleunigung auf eine Leuchtstoffschicht durch eine elektrische Spannung.



Vakuum-Fluoreszenzdisplay, alle Anodensegmente leuchten aufgrund externer Ultraviolett-Bestrahlung

Biochemie und Medizin

An große Biomoleküle kann durch eine chemische Reaktion eine fluoreszierende chemische Gruppe angehängt werden, die dann als sehr sensibler Marker für dieses Molekül dient. Beispiele:

- Bei der automatischen Sequenzierung der DNA mit der Sanger-Methode hat jede der vier terminierenden Nukleinbasen eines DNA-Stückes ihren spezifischen fluoreszierenden Marker. Wenn die markierten DNA-Moleküle getrennt werden, werden die Marker durch UV-Licht angeregt, und die Identität der Marker wird anhand der Wellenlänge des emittierten Lichtes festgestellt.
- Die Verbindung Ethidiumbromid zeigt kaum Fluoreszenz, wenn sie in einer Lösung ihre Konformation frei ändern kann. Durch Bindung an DNA wird die Fluoreszenz jedoch stark erhöht, was sie nützlich bei der Lokalisierung von DNA-Fragmenten macht, z. B. bei der Agarose-Gelelektrophorese.
- Die Aminosäuren Tryptophan, Tyrosin und Phenylalanin fluoreszieren bei Anregung durch UV-Licht, wobei auch bei Proteinen und Peptiden, die diese Aminosäuren enthalten, Fluoreszenz beobachtet werden kann.
- Auf DNA-Chips und Protein-Chips wird Fluoreszenz für die Detektion verwendet.
- In der Immunologie werden Antikörper mit einer fluoreszierenden chemischen Gruppe versehen, so dass die Orte (z. B. eines mikroskopischen Objektes), an die die Antikörper binden, anhand der Fluoreszenz erkennbar sind. Die Antigen-Konzentration kann damit sogar quantitativ bestimmt werden.
- Diagnostik der Stoffwechselerkrankungen der Häm-Bildung (Porphyrien): Die Vorläuferstoffe des Häms (Porphyrine) fluoreszieren bei geeigneter Anregung, so dass über hochleistungsfähige chromatographische Verfahren (HPLC) quantitative Messungen in Blut-, Stuhl- und Urinproben möglich sind.
- Fluoreszierende Proteine wie das GFP (*Green fluorescent protein*) dienen als Marker für verschiedenste biologische Vorgänge innerhalb der Zellen wie zum Beispiel die Genexpression.
- Die Aktivierung eines fluoreszierenden Akzeptors nach Fluoreszenzanregung eines benachbarten Donors durch FRET (*Fluorescence resonance energy transfer*) wird in der Biochemie und der Zellbiologie zu Abstandsmessungen im Nanometerbereich genutzt.

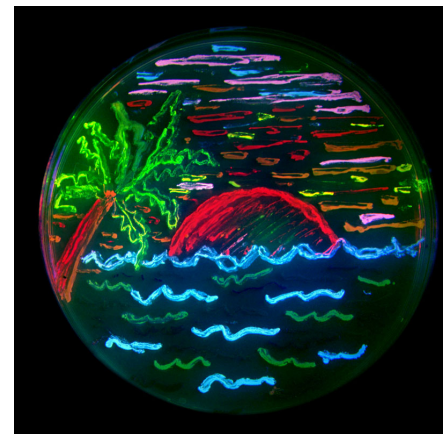
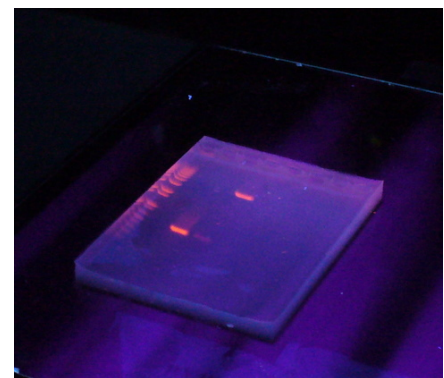


Illustration von verschiedenen fluoreszierenden Proteinen in Bakterien.



Mit Ethidiumbromid gefärbtes Agarose-Gel.

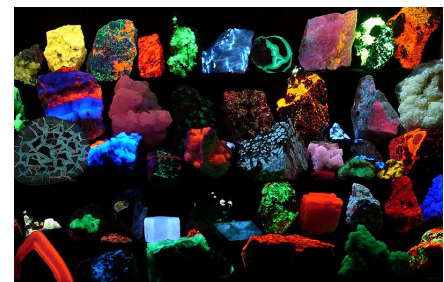
- Markierung von Proteinen für die differentiellen 2D-PAGE (2D-DIGE)
- FACS (*Fluorescent activated cell sorter* oder Durchflussscytometrie)
- FISH (*Fluorescence in situ hybridization*) Chromosomenanalyse
- Beobachtung einzelner Moleküle mittels Einzelmolekülfluoreszenzspektroskopie
- Die Vital-Fluoreszenz-Doppelfärbung dient der Unterscheidung zwischen lebenden und toten Zellen.
- TRFIA = time-resolved fluoroimmunoassay. Eu^{3+} -Ionen fluoreszieren in Wasser nur kurz. Deshalb verwendet man Chelatbildner, die um die Eu^{3+} -Ionen herum eine hydrophobe Umgebung aufbauen. Das führt zu einer längeren Dauer der Fluoreszenz. Dadurch wird eine Unterscheidung von allen anderen, kurzlebigeren Fluoreszenzen möglich, die in organischen Gemischen vorkommen können.

Mineralogie, Gemmologie (Edelsteinkunde) und Forensik

Mineralien, Edelsteine, Fasern und viele andere Materialien, die in der Forensik oder an Sammlerstücken und Antiquitäten untersucht werden, haben unterschiedliche Fluoreszenzeigenschaften, wenn sie mit kurz- oder langwelligem UV-Licht oder mit Röntgenstrahlen bestrahlt werden, und können dadurch identifiziert werden.

Kosmische Strahlung

Hochenergetische Kosmische Strahlung löst in der Erdatmosphäre Teilchenkaskaden, sog. ausgedehnte Luftschauer, aus. Die geladenen Teilchen dieser Schauer regen die Stickstoffmoleküle der Luft an, so dass diese Fluoreszenzlicht ausstrahlen. Durch Messungen dieses Lichtes lassen sich Rückschlüsse auf die primäre kosmische Strahlung gewinnen. Ähnliche Phänomene sind das Polarlicht, bei dem die Anregung der Luftmoleküle in erster Linie durch die Teilchen des Sonnenwindes erfolgt, und die Strahlung des leuchtenden Kometenschweifs, bei dem infolge der Wechselwirkung mit dem Sonnenwind Moleküle Licht ausstrahlen.



Fluoreszierende Minerale

Biologie und Paläontologie

Die Cuticula der Skorpione fluoresziert bei Bestrahlung mit Ultraviolettstrahlung. Dabei werden eingelagerte beta-Carboline und 7-Hydroxy-4-methylcoumarin angeregt. Auch nach dem Ableben der Tiere bleibt dieser Effekt erhalten. Mit Hilfe entsprechender Lampen können die Tiere daher bei Dunkelheit leicht entdeckt werden.

Auch in der Paläontologie nutzt man Fluoreszenz zum Auffinden und zur Untersuchung von zahlreichen Fossilien.



Euscorpius italicus unter UV-Licht

Bildende Kunst

Fluoreszierende Farben stellen ein Stilmerkmal in der Psychedelischen Kunst dar.

Fluoreszierende Farbstoffe (Auswahl)

- Fluoresceine
- Rhodamine
- Cumarine
- Berberin
- Chinin
- DAPI
- Nilblau / Nilrot
- Allophycocyanin
- Indocyaningrün
- Stilbene
- Porphyrine, (Häme, Chlorophylle etc.)
- Fluoreszierende Proteine
- Quadraine (Quadratsäurefarbstoffe) auf Basis von N,N-Dialkylanilinen
- 1,3,2-Dioxaborine (Komplexe von Borsäurederivaten mit 1,3-Dicarbonylverbindungen)
- Epicocconon
- IAEDANS
- TMRM+

weitere Farbstoffe: in der Kategorie Fluoreszenzfarbstoff



Nilrot bei Tageslicht (obere Reihe) und UV-Licht (366 nm, untere Reihe) in verschiedenen Lösungsmitteln.

V.l.n.r.: 1. Wasser, 2. Methanol, 3. Ethanol, 4. Acetonitril, 5. Dimethylformamid, 6. Aceton, 7. Ethylacetat, 8. Dichlormethan, 9. *n*-Hexan, 10. *tert*-Butylmethylether, 11. Cyclohexan, 12. Toluol.

Siehe auch

- Parametrische Fluoreszenz
- (Sensibilisierte) Chemolumineszenz

Einzelnachweise

- [1] Stokes G. G. (1852) *Phil. Trans.* **142**, 463-562
- [2] J. C. Poggendorf (Hrsg.): *Annalen der Physik*, Bd. 4, Verlag J. A. Barth, Leipzig 1854. S. 313
- [3] H. J. Meyer (Hrsg.): *Neues Konversations-Lexikon - Ein Wörterbuch des allgemeinen Wissens*, Bd. 6, Verlag Bibliographisches Institut, Hildburghausen 1863. S. 936
- [4] Optische Aufheller, Geschichtliches und Stoffgruppen (<http://www.chemie.uni-jena.de/institute/oc/weiss/aufheller.htm>)

Weblinks

- Fluorophores.org – Datenbank für Fluoreszenzfarbstoffe (<http://www.fluorophores.org>)
- Fluorescence Spectra Viewer (<http://www.invitrogen.com/site/us/en/home/support/Research-Tools/Fluorescence-SpectraViewer.html>)
- Fluoreszenz von Mineralien (<http://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/Fluoreszenz>) Mineralienatlas
- LP: Natrium-Resonanzfluoreszenz (<http://lp.uni-goettingen.de/get/text/1631>), Georg-August-Universität Göttingen
- Lichtmikroskopie online (http://www.univie.ac.at/mikroskopie/3_fluoreszenz/fluoreszenz.htm) Universität Wien
- Fluorescence Microscopy (<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/techniques/fluorescence/fluorhome.html>) Umfangreiches interaktives Tutorial (englisch)
- Basic Principles of Fluorescence Spectroscopy (<http://www.jobinyvon.de/Fluorescence/Slideshows>) Tutorial auf englisch

Färben

Beim **Färben** wird textiles Material durch Aufbringen von Farbmitteln in Färbe- oder Druckprozessen *koloriert* („gefärbt“). Den umgekehrten Prozess nennt man Bleichen, wobei die natürlichen Färbungen der Fasern beseitigt werden.

Das **Färberwesen** hat eine jahrtausendealte Tradition und ein eigenes Berufsbild mit zahlreichen Spezialisierungen herausgebildet. Heute wird es – sofern nicht handwerklich ausgeführt – der chemischen Industrie zugerechnet.



Eine traditionelle Färberei in Fès

Historisches

Die wenigen Kenntnisse über die Färbemethoden des Altertums stützen sich hauptsächlich auf Gräberfunde und Aufzeichnungen griechischer und römischer Schriftsteller und deren technologischen Beschreibungen. Genauer kann man über die Farbstoffe aussagen. Jahrtausende war man dabei auf natürliche Farbstoffe aus Mineralien (Ocker, Zinnober), aus Pflanzen wie Indigo, Rotholz, (siehe auch Färberpflanzen) oder von Tieren (Schildlaus, Purpurschnecke) angewiesen. Bereits aus dem alten Ägypten gibt es Funde von mit Krapp gefärbten Textilien. Nach der Entdeckung Amerikas bekamen die Färbereien Europas noch einmal einen neuen Auftrieb, was vor allem an den importierten Farbhölzern lag.

Im Mittelalter waren die Färber Lohnwerker der anderen tuchverarbeitenden Zünfte. Erst spät entstanden eigene Färberzünfte. Es gab seit dem Mittelalter die Unterscheidung von verschiedenen Färbern:^[1]

- *Schwarzfärber, Leinwandfärber, Schlechtfärber*, die Innung der Färber, die allgemein grobe Stoffe färbten
- *Tuchfärber*, die auf das Färben von Wolle spezialisiert waren
- *Blaufärber, Waidfärber*, die ursprünglich ausschließlich den einheimischen Waid, später auch den viel teureren importierten Indigo verwendeten
- *Schönfärber*, eine später aufgekommene Bezeichnung für die Verwendung ausländischer Farbstoffe in der Anwendung insbesondere auf feine Stoffe (hierher rührt die Metapher „Schönfärberei“)
- *Türkisch-Rotfärber*, die auf das Färben eines besonderen Rot-Tons spezialisiert waren
- *Seidenfärber*
- *Rauchfärber und Zobelfärber*, die Leder und Felle (Rauchwaren) färbten
- *Garnfärber*

Diese Spezialisierungen wurden aber lokal und zeitlich unterschiedlich bezeichnet oder zu verschiedenen Berufsgruppen zusammengefasst.

Das Färben galt im Mittelalter als ein ausgesprochen schmutziges Geschäft. Färber galten häufig als unrein, weil sie mit übelriechenden Substanzen umgingen.^[2] Mit den Kreuzfahrten begann in Europa jedoch ein erhöhtes Interesse an aufwändig gefärbten Materialien. Im 13. Jahrhundert expandierte der europäische Markt für aufwändig gefärbte Stoffe. Ausgebildete Färber waren sehr gefragt, was zur Ausbildung eigener Zünfte und Gilden führte. Eine der bekanntesten Färberzünfte des späten Mittelalters war die „*Arte di Calimala*“ in Florenz, die so hohe Anforderungen an die Produkte ihrer Zunft stellte, dass sie alle Tücher, die nicht entsprechend den Qualitätsstandards gefärbt waren, verbrannte und die verantwortlichen Färber mit Geldstrafen belegte.^[3]

Die im 19. Jahrhundert entwickelten synthetischen Farbstoffe haben heute die Naturfarbstoffe fast vollständig verdrängt, wobei die Reaktivfarbstoffe, gefolgt von den Dispersions- und Direktfarbstoffen die größte Bedeutung haben. Die Farbstofflösung wird als „Farb-“ oder „Färbeflotte“ oder als „Färbebad“ bezeichnet.



Ein Färber in einem Hausbuch des 15. Jhd.



Zunftwappen der Färber

„Drucken“ kann als örtlich begrenztes Färben bezeichnet werden.

Das Färben kann in der textilen Verarbeitungskette fast überall geschehen:

- einzelne Fasern oder ganze Wollvliese können vor dem Spinnen gefärbt werden
- fertig gesponnenes Garn kann gefärbt werden
- ein Gewebe oder Gestrick kann gefärbt werden

Je eher jedoch gefärbt wird, umso mehr vermischen sich mögliche Unregelmäßigkeiten im Endprodukt.

Färbeverfahren

Das Färben wird in drei Verfahren unterteilt:

- Beim *Ausziehverfahren* (*diskontinuierliche Färbeverfahren*) werden die Farbstoffe in Wasser gelöst oder dispergiert. Entsprechend der unterschiedlichen Affinität unterschiedlicher Farbstoffklassen zu dem zu färbenden Substrat werden Chemikalien und Textilhilfsmittel der Flotte in einer oder mehreren Teilen bzw. dosiert innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls zugesetzt. Während eines definierten Zeit/Temperaturverlaufs sowie kontrollierter Bewegung des Materials und/oder der Flotte zieht der Farbstoff gleichmäßig auf das Material, und wird zumeist im selben *Färbebad* - selten in einem zweiten Behandlungsbad - auf der Faser fixiert. Der Anteil des nicht fixierten Farbstoffs wird in nachfolgenden Behandlungsbädern entfernt.
- Beim *Kontinueverfahren* wird die Farbstofflösung durch *Foulardieren* (auch *Klotzen* genannt) auf das Substrat aufgebracht. Im Foulard wird die Farbflotte auf das Textilgut geklotzt. Dabei erfolgt eine gleichmäßige Benetzung des Materials mit Farbflotte und ein über die Warenbreite gleichmäßiges Abquetschen zwischen meist zwei oder drei Hartgummiwalzen auf definierte Flottenaufnahme. Danach werden die Farbstoffe auf die Faser fixiert, was entweder durch Verweilung (*Klotz-Kalt-Verweilverfahren* über mehrere Stunden) oder durch Behandlung mit Dampf (Sattdampf bei über 100 °C (*PadSteam-Verfahren*) oder überhitzter Dampf bei z. B. 180 °C) oder Trockenhitze bis zu 220 °C in wenigen Sekunden bis Minuten geschehen kann. Danach schließt sich ein Auswaschprozess an, um den nichtfixierten Farbstoff von der Faser zu lösen und gute Echtheiten zu erhalten.
- Beim *Semikontinueverfahren* erfolgt die Imprägnierung der Ware im Foulard kontinuierlich, die Fixierung des Farbstoffs zu einem späteren Zeitpunkt ebenfalls kontinuierlich oder diskontinuierlich.

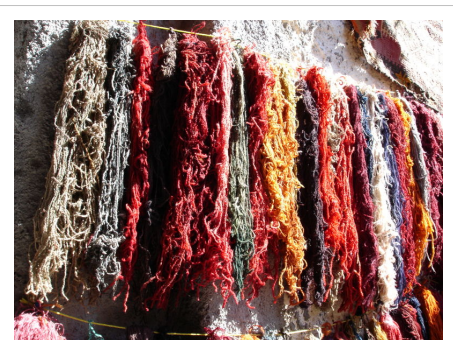
Bezüglich der chemischen Vorgänge bei der Färbung lassen sich vier Färbeverfahren in der modernen Textilfärberei unterscheiden:

- Direktfärbeverfahren
- Entwicklungsfärbung
- Reaktivfärbung
- Dispersionsfärbung

Farbstoffklassen

Die geeignete Farbstoffklasse wird in erster Linie nach dem zu färbenden Substrat und dem geforderten/notwendigen Echtheitsniveau (Widerstandsfähigkeit der Färbung gegen Einflüsse während der Weiterverarbeitung und dem Gebrauch des textilen Fertigmaterials) ausgewählt.

Abhängig vom Artikel (Zusammensetzung (Mischung), Garntyp, Maschen/Webware, Bindung, Gewicht, Anforderung an den Griff der Fertigware, usw.) erfolgt die Entscheidung über die einzusetzende Färbemaschine bzw. Apparate oder Färbeanlagen. Danach wird je nach Farbstoffklasse das geeignete Färbeverfahren festgelegt.



Gefärbte Wolle

Für cellulosische Fasern können u. a. eingesetzt werden:

- Das Färben mit *Küpenfarbstoffen*, ein Verfahren, indem die Oberfläche von den Fasern mit wasserunlöslichen Farbmolekülen durch Adsorption gebunden werden. Vorteil ist die hohe Farbechtheit. Der bekannteste Küpenfarbstoff ist Indigo.
- Das Färben mit *Entwicklungsfarbstoffen*, ein Verfahren wobei der Farbstoff erst auf den Fasern hergestellt wird (zum Beispiel durch Azokupplung). Die erste wasserlösliche Komponente wird mit der Faser durch Adsorption aufgenommen, die zweite Komponente bildet dann einen wasserunlöslichen Azofarbstoff. Dabei haftet die Farbe dann an der Faser durch Bildung von Van-der-Waals-Kräften und Wasserstoffbrückenbildung. Außerdem wirken noch Kräfte zwischen polarisierten Molekülgruppen.
- Das Färben mit *Direktfarbstoffen* (Substantive Farbstoffe), ein Verfahren bei dem die Farbstoffe direkt aus der Färbeflotte auf die Fasern aufziehen. Es wird meist bei Mitteln zum Selberfärben zu Hause angewandt.

Weitere Farbstoffklassen sind im Artikel Farbstoffe aufgeführt.

Färbemaschinen/Färbeapparate/Färbeanlagen

Beim Färben nach dem Ausziehverfahren unterscheidet man zwischen *Färbeapparat* (die Flotte wird durch das ruhende Färbematerial gepumpt) und *Färbemaschine* (die Ware wird durch eine ruhende Flotte bewegt, wobei bei praktisch allen heute gebräuchlichen Maschinen zusätzlich zur Warenbewegung auch eine gezielte Flottenumwälzung erfolgt).

Wird nach Kontinueverfahren gefärbt, spricht man von *Färbeanlage*.

Die *Färbemaschinen* für das Ausziehverfahren werden unterteilt in solche für Temperaturen unter 100 °C und solche für Hochtemperatur. Naturfasern können meist bei moderaten Temperaturen gefärbt werden, das Färben findet in günstigen Maschinen unter atmosphärischem Druck statt. Synthetische Fasern (insbesondere Polyester) nehmen Farbstoffe meist bei Temperaturen über 100 °C auf. Da das Wasser bei Umgebungsdruck verdampfen würde, muss das Färben unter Druck stattfinden. Üblich sind Temperaturen bis 135 °C bei einem statischen Druck bis 4,0 bar. Dies erfordert druckdichte und damit teurere Maschinen.

Besonders problematisch ist das Färben von Fasermischungen aus synthetischen und natürlichen Fasern. Es wird meist mit zwei unterschiedlichen Farbstoffklassen gefärbt, wobei die unterschiedlichen Fasern möglichst farbgleich gefärbt sein sollen. (*Ton-in-Ton-Färbung*).

Für die unterschiedlichen Aufmachungen stehen verschiedenen Maschinen zur Verfügung:

- Im *Jigger* wird das Färbegut in gespannten und faltenfreien Zustand durch die Farbflotte geführt. Dies garantiert eine gleichmäßige Farbverteilung über die ganze Breite.
- In der *Haspelkufe* wird das Gewebe ohne Spannung breit oder im Strang durch die Flotte geführt, dadurch wird die Ware nicht verzogen.
- In der *Düsenfärbmaschine* werden das Textilgut und die Flotte bewegt.

Umweltaspekte

Das Färben von Textilien wird seit der industriellen Revolution industriell praktiziert. Den wässrigen Farbstofflösungen oder Farbstoffdispersionen werden dabei andere Chemikalien (Salze, Säuren, Alkalien) und Textilhilfsmittel zugesetzt, die, sollten sie unbehandelt in die Umwelt gelangen, diese mitunter stark belastet würden. Damals wurden die Restflotten und Abwässer direkt in Flüsse geleitet, die dann auch farbig waren. Heute ist dies in vielen Teilen Europas und der USA dank massiver Investitionen in Abwasserbehandlungsanlagen und Einsatz moderner Farbstoffe sowie die Streichung respektive das Verbot mancher problematischer Produkte als gelöst anzusehen. In vielen anderen Teilen der Erde, v. a. manchen asiatischen und osteuropäischen Ländern ist noch nicht dasselbe Niveau im Umweltschutz verwirklicht.

Siehe auch

- Kolorieren – Bezeichnung für das Anbringen von Farbe in der bildenden Kunst und im Kunsthandwerk
- Bogolan, afrikanische Färbetechnik

Literatur

- Dorit Berger: *Färben mit Naturfarben. Färbepflanzen, Rezepte, Anwendungsmöglichkeiten*. Stuttgart 1998
- Rita Buchanan: *A weaver's garden: growing plants for natural dyes and fibers*. Loveland (Colorado) 1987, Neuausgabe 1999
- *Herbig's großes Buch der Handarbeiten*. Herbig, München 1983
- *Farbe, Färber, Farbensymbolik*, in: *Lexikon des Mittelalters*. Bd. IV. München und Zürich 1989, S. 286–289
- Lydie Nencki: *Die Kunst des Färbens mit natürlichen Stoffen. Geschichte – Methoden – Rezepte*. Bern und Stuttgart 1984 (Originaltitel: *La science des teintures animales et végétales*, 1981)
- Carl Wilhelm Poerner: *Anleitung zur Färbekunst, vorzüglich Tuch und andre aus Wolle gewebte Zeuge zu färben*. Weidmann und Reich, Leipzig 1785 (Digitalisat ^[4])
- Eberhard Prinz: *Färberpflanzen, Anleitung zum Färben, Verwendung in Kultur und Medizin*. Schweizerbart, Stuttgart 2009, ISBN 978-3-510-65258-7
- H. Schweppe: *Handbuch der Naturfarbstoffe. Vorkommen, Verwendung, Nachweis*. ecomed-Verlag, Landsberg/Lech 1993
- Ernst Ploss: *Ein Buch von alten Farben*. München 1967
- H. Grunfelder: *Die Färberei in Deutschland vor 1300*. Freiburg i.B. 1922
- Guido Ebner u. Dieter Schelz: *Textilfärberei und Farbstoffe*, Springer-Verlag, Berlin, 1989
- Simon Garfield: *Lila - Wie eine Farbe die Welt veränderte*, Siedler-Verlag, Berlin, 2001
- Wilfred Kratzert u. Rasmus Peichert: *Farbstoffe*, Verlag Quelle & Meyer, Heidelberg, 1981


Weblinks

- Farbstoffe und Färben - Ein Kurzlehrgang - von Rüdiger Blume und Dagmar Wiechoczek ^[5]
- Eberhard Prinz: "Färberpflanzen aus Frühzeit und Mittelalter" ^[6]

Einzelnachweise

- [1] Eintrag *Färben*. In: J. G. Krünitz: *Oekonomische Encyklopädie*. (online (<http://www.kruenitz1.uni-trier.de/>), Uni Trier)
- [2] Amy Butler Greenfield: *A Perfect Red – Empire, Espionage and the Qest for the Color of Desire*, HarperCollins Publisher, New York 2004, ISBN 0-06-052275-5, S. 14
- [3] Amy Butler Greenfield: *A Perfect Red – Empire, Espionage and the Qest for the Color of Desire*, HarperCollins Publisher, New York 2004, ISBN 0-06-052275-5, S. 15
- [4] <http://www-gdz.sub.uni-goettingen.de/cgi-bin/digbib.cgi?PPN513073736>
- [5] <http://www.chemieunterricht.de/dc2/farben/>
- [6] http://www.eberhardprinz.de/farberpflanzen_hom/
-

Färberwaid

Färberwaid

Färberwaid (<i>Isatis tinctoria</i>)
Systematik
<p>Rosiden</p> <p>Eurosiden II</p> <p><i>Ordnung:</i> Kreuzblütlerartige (Brassicales)</p> <p><i>Familie:</i> Kreuzblütengewächse (Brassicaceae)</p> <p><i>Gattung:</i> Waid (<i>Isatis</i>)</p> <p><i>Art:</i> Färberwaid</p>
Wissenschaftlicher Name
<i>Isatis tinctoria</i>
L.

Der **Färberwaid** (*Isatis tinctoria* L.) oder **Deutsche Indigo** ist eine zweijährige Pflanze aus der Familie der Kreuzblütengewächse (Brassicaceae). Er stammt aus Westasien, wurde aber bereits vor vielen Jahrhunderten in Europa als Färberpflanze kultiviert.

Beschreibung

Im ersten Jahr bildet die zweijährige Pflanze eine Blattrosette mit 20-30 cm langen lanzettlichen und ganzrandigen Blättern von blau-grüner Färbung. Diese sind meist kahl, nur später gebildete sind behaart. Färber-Waid erreicht in der Regel eine Größe von 30-150 Zentimeter.

Im zweiten Jahr wachsen bis zu 120 bis 150 cm hohe aufrechte Stängel, die oben verzweigt und kahl, unten mit einzelnen Haaren besetzt sind. Die untersten Blätter sterben zur Blütezeit

Färber-Waid blüht zwischen Mai und Juli. Die Blütenstände bestehen aus mehreren Trugdolden mit gelben, rapsähnlichen Blüten, welche sich am Stängelende zu einem ausladenden Gesamtblütenstand verbinden. Die Einzelblüten sind tragblattlos, die vier gelben Blütenblätter haben einen Durchmesser von 4 bis 8 Millimeter, sind

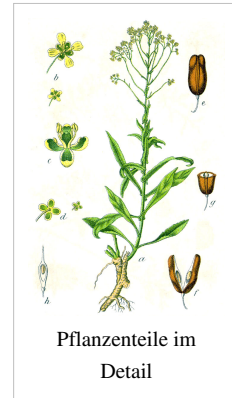
spatelig-zungenförmig und an der Spitze abgerundet. Es sind zudem vier gelblich-grüne, schmale-eiförmige Kelchblätter vorhanden. Der Fruchtknoten ist keulenförmig und flach. Die bläuliche Frucht ist ein Schötchen von 0,8 bis 2 Zentimeter Länge und 3-7 Millimeter Breite mit je ein bis zwei ölhaltigen Samen. Sie hängt an einem 5-8 Millimeter langen Stiel, der sich zum Fruchtsatz hin verdickt.



Wuchs, Gesamtansicht



Blütenstände

Pflanzenteile im
Detail

Verbreitung

Der Färberwaid stammt aus Westasien, wurde allerdings bereits im Mittelalter in Europa kultiviert und gilt daher als Archäophyt. Der Färberwaid wächst heute hauptsächlich als verwilderte Pflanze in Europa. Als Standorte werden trockene Hänge, Felsen und trockene Ruderalstellen bevorzugt.

Systematik

Neben der Nominatform wird unterschieden:

- *Isatis tinctoria* subsp. *koelzii* (Rech.f.) Jafri: (Pflanze und Früchte kleiner, Afghanistan, Pakistan)

Verwendung

Die Blätter enthalten das farblose Glykosid Indican, das nach der Ernte enzymatisch in Zucker und Indoxyl gespalten und zu Indigo oxidiert wird (Fermentation). Die vollständige Umwandlung nach einem Färbevorgang nimmt etliche Stunden in Anspruch.

Die Behauptung, hiervon leite sich der Ausdruck *blaumachen* ab, ist nur eine von mehreren ungesicherten Vermutungen (siehe hierzu den Artikel Blauer Montag).

Für die im Herstellungsprozess des Farbstoffs benötigte Laugenbeize wurde **Waidasche** aus Buchenholz verwendet. Wegen des Holzschutzeffektes (gehemmtes Pilzwachstum) eignet sich die aus Färberwaid gewonnene blaue Farbe auch zum Streichen von beispielsweise Türen, Deckenbalken und Kircheninnenräumen.

Aus den Wurzeln der Färberwaidpflanze wird der *Waidbitterlikör* hergestellt. Außerdem wird die Färberwaidwurzel (*Isatidis Radix*) als traditionelles chinesisches Heilmittel (chines. Bezeichnung: *Banlangen*) zur Bekämpfung von Grippeinfektionen (aber auch

Der Waidstein in Sömmerda, mit ihm wurde im
Mittelalter Färberwaid zerkleinert

Masern, Mumps) verwendet. Banlangen war vor allem während der SARS-Epidemie in China sehr gefragt gewesen, obwohl eine Wirkung gegen Viren nicht nachgewiesen werden konnte.

Geschichte

Die Pflanze wird seit dem Altertum als Färberpflanze kultiviert. In Deutschland wird der Färberwaid seit dem 9. Jahrhundert, hauptsächlich in Thüringen angebaut. Die Stadt Erfurt erlangte als Zentrum des Waidhandels Macht und Reichtum, ebenso wie die anderen Waidstädte. Zur Verarbeitung waren Waidmühlen erforderlich. Färberwaid war etwa bis ins 16. Jh. sehr wichtig für die Herstellung von blauem Leinen. Er wurde dann durch die Einfuhr von *echtem Indigo* aus dem tropischen Schmetterlingsblütler *Indigofera tinctoria* zurückgedrängt. Seit der synthetischen Herstellung von Indigo im Jahr 1880 ist auch der natürliche Indigo vom Markt verschwunden.

Die dominierende Farbe des Mittelalters war wahrscheinlich die Farbe des Färberwaid: Blaugrün.

Nach dem Mauerfall gab es vor allem in Thüringen eine starke Nachfrage nach der blauen Farbe aus Färberwaid zur originalgetreuen Restaurierung von Kirchen und anderen Gebäuden.

Durch Züchtung gibt es mittlerweile auch gelbe bis rote Farbtöne. Waid hat heutzutage als Ökofarbe eine gewisse Bedeutung.

Literatur

- Fischer, F.: *Das blaue Wunder Waid. Wiederentdeckung einer alten Nutz- und Kulturpflanze*. 91 Seiten, vgs Verlagsgesellschaft, Köln 1997.
- Dietmar Aichele, Heinz-Werner Schwegler: *Die Blütenpflanzen Mitteleuropas, Band 3, Nachtkerzengewächse bis Rötegewächse*. Seite 290, Franckh-Kosmos, Stuttgart 1995. ISBN 3-440-06193-0
- K.U.Heyland, H. Hanus, E.R. Keller: Ölfrüchte, Faserpflanzen, Arzneipflanzen und Sonderkulturen In: *Handbuch des Pflanzenbaues*, Bd. 4, S. 527-531, ISBN 3800132036

Weblinks

- Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe: Färberwaid ^[1] Kurze Auskunft über Merkmale, kulturgeschichtlichen Hintergrund und Anbau.
- T. Seilnacht: Färberwaid, *Isatis tinctoria* ^[2] (Kurzbeschreibung mit einem Foto)
- Erfurt und der Waidanbau in Thüringen ^[3]
- Hirschmugl KEG: Infos über *Isatis Tinctoria* (Färberwaid) ^[4]
- Datenblatt mit Bildern vom Färberwaid (*Isatis tinctoria* L.) ^[5]

Referenzen

[1] <http://www.fnr-server.de/cms35/index.php?id=111>

[2] <http://www.digitalefolien.de/biologie/pflanzen/faerbe/waid.html>

[3] <http://www.erfurt.de/ef/de/entdecken/tradition/waid/>

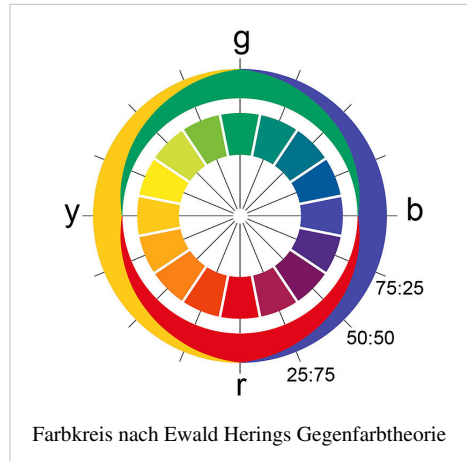
[4] <http://www.waid.at>

[5] <http://www.dyeplants.de/faerberwaid.html>

Gegenfarbtheorie

Die **Gegenfarbtheorie** (oder *Gegenfarbentheorie*) ist eine historische Theorie zur Wahrnehmung der Farben im menschlichen Auge. Sie wurde 1874 bzw. 1878 von Karl Ewald Konstantin Hering (1834–1918) als ein Alternativvorschlag zur Dreifarbentheorie von Thomas Young und Hermann von Helmholtz veröffentlicht.

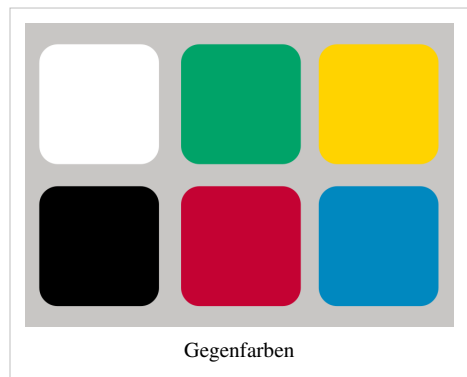
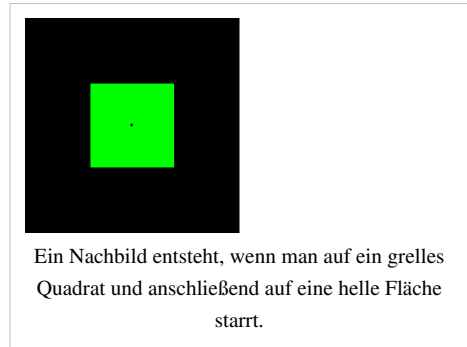
Hering ging von der Beobachtung aus, dass man sich Farbeindrücke wie „gelbliches Blau“ oder „rötliches Grün“ nicht vorstellen kann (gegenseitiger Ausschluss von Gelb und Blau bzw. Grün und Rot). Darum vermutete er drei getrennte chemische Prozesse in der Netzhaut mit je zwei *Gegenfarben*, mit je einem hemmenden und einem erregenden Anteil, die nach einem Gleichgewicht streben. Die Gegenfarbpaare sind Blau–Gelb, Rot–Grün und Schwarz–Weiß.



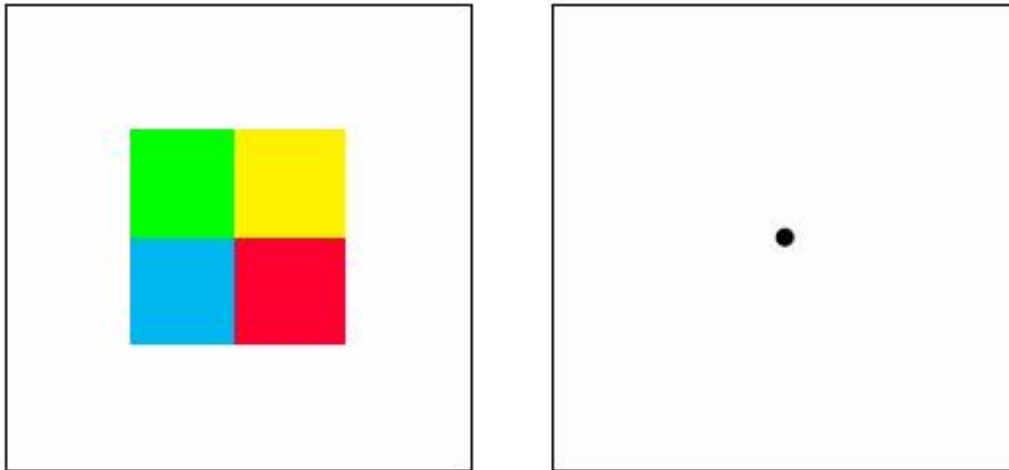
Entstehung der Gegensatzpaare

Die Erkenntnis über die oben erwähnten Gegensatzpaare beruhen auf folgenden Beobachtungen:

- Bei Betrachtung aller Farbtöne erscheinen für die meisten Menschen die vier Farben Rot, Grün, Gelb und Blau als besonders rein. Hering bezeichnete diese Farben als Urfarben. Andere Töne empfindet man immer als Mischung.
- Beim längeren Betrachten einer Farbfläche und anschließender Betrachtung einer neutralen hellen Fläche entstehen Nachbilder in der jeweiligen Gegenfarbe. Diesen Prozess nennt man heutzutage Sukzessivkontrast. Den Sukzessivkontrast (*sukzessiv* = „aufeinanderfolgend“) erklärt Hering folgendermaßen: Im Schwarz-Weiß-Prozess habe ein als Weiß wahrgenommener Reiz eine hemmende Wirkung. Da jedoch ein Gleichgewicht angestrebt werde, bliebe nach Ausschalten des Reizes (weiß) ein schwarzes Nachbild, das durch die Dominanz des nun überwiegenden anregenden Anteils des Prozess verursacht werde.



Schauen Sie ca. 30 sec genau auf die Mitte des Quadrats mit vier Farben. Blicken Sie anschließend auf das Feld mit dem kleinen Punkt in der Mitte. Was fällt Ihnen auf?



Sie sehen ein Nachbild des Objekts in Komplementärfarben. Diese Erscheinung konnte mit der Dreifarbentheorie nicht erklärt werden.

- Farbige Flächen beeinflussen das Aussehen angrenzender Flächen in Richtung der eigenen Gegenfarbe (Simultankontrast). Der Simultankontrast (*simultan* = zeitgleich) entsteht nach Hering folgendermaßen: Ein Reiz regt nicht nur das Areal an, das er betrifft, sondern auch die Nachbarregionen, jedoch in entgegengesetzter Richtung. So kann z. B. eine sehr helle oder weiße Umgebung ein Objekt in deren Mitte schwarz erscheinen lassen.
- Man kann sich keine Mischfarben „gelbliches Blau“ oder „rötliches Grün“ vorstellen.
- Die krankhaften Störungen des Farbsehens äußern sich oft in einem Verlust der Unterscheidungsfähigkeit zwischen blau-gelb bzw. rot-grün.

Bestätigung der Gegenfarbentheorie

Obwohl Herings Vorstellungen stark vereinfachend waren, konnten diese drei Prozesse tatsächlich nachgewiesen werden. Seit 1966 bestätigen neurophysiologische Untersuchungsergebnisse, dass es vier grundlegende Farbempfindungen gibt.

Drei verschiedene Zapfentypen im Auge, die jeweils für kurz (blau)-, mittel (grün)- und langwellige (rot) Lichtstrahlen empfindlich sind, liefern Impulse an die nachgeschalteten neuronalen Farbkanäle. Auf der neuronalen Ebene werden die Farbreize „verschaltet“: Rot und Grün werden subtrahiert, die Differenz wird im Rot-Grün-Kanal weitergeleitet; die Addition von Rot und Grün dagegen ergibt die Empfindung von Gelb; diese Impulse werden vom Blau subtrahiert und im Gelb-Blau-Kanal weitergeleitet. Alle Farben werden außerdem gegeneinander abgewogen und in einem Signal im Schwarz-Weiß-Kanal zusammengefasst. So entstehen, wie auch Hering gemeint hat, drei Empfindungsdimensionen: 1. Helligkeit, 2. Gelb-Blau-Komponente, 3. Rot-Grün-Komponente, aus denen dann mehrere tausend Farbart unterschieden werden können.

Farbsysteme basierend auf Gegenfarbentheorie

Die Heringsche Gegenfarbtheorie bildet die Grundlage für das in neuerer Zeit benutzte „Natural Color System“ (NCS). Auch das Modell des Lab-Farbraums beruht unter anderem auf der Gegenfarbtheorie von Hering.

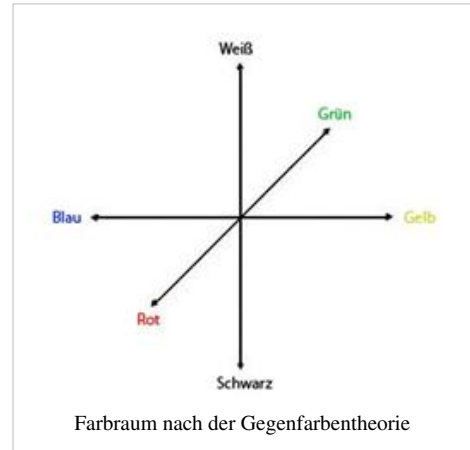
Siehe auch Farbwahrnehmung.

Weblinks

- Farbwahrnehmungs-Skript. In: "http://www.idd.tu-darmstadt.de/media/fachgebiet_idd/studium_und_lehre/vorlesungen_4/farbwiedergabe_in_den_medien/farbwiedergabeindenmedien/fim_052_farbwahrnehmung_08_10_16.pdf"
- Psychologie für Designer. In: "<http://dirk-berger.com/farbe.htm>"
- "<http://www.allpsych.uni-giessen.de/hansen/teaching/VorlesungWahrnehmungUndSinnesphysiologieSS2005/Wahr-05-farbe-2.pdf>"
- Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn: "http://www.archive.org/stream/grundzgederleh00heriuoft/grundzgederleh00heriuoft_djvu.txt"

Literatur

- Johannes Webers: *Handbuch der Film- und Videotechnik* 8. Auflage, Franzis Verlag, 2007
- Manfred von Ardenne: *Effekte der Physik und ihre Anwendungen*, Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1988
- Klaus Simon: "Farbe im Digitalen Publizieren: Konzepte der digitalen Farbwiedergabe für Office, Design und Software (X.Media.Press)", Springer Verlag, 2007



Gelb

Zitronengelb	Neutralgelb (Hexadezimal FFFF00)
Goldgelb (Gold, W3C)	Indischgelb

Gelb ist die Farbe, die wahrgenommen wird, wenn Licht mit einer spektralen Verteilung ins Auge fällt, bei der das Maximum im Wellenlängenintervall bei 565 bis 575 nm^[1] liegt. Licht mit dieser Eigenschaft kann auch als Körperfarbe remittiert sein.

Die Kennzeichnung von Gelb erfolgt meist als *Y* (en: *yellow*), in der Elektrotechnik wird die Farbe mit *gb* abgekürzt.

Farblehre

In der Subtraktiven Farbmischung ist Gelb eine der Grundfarben, in der Additiven Farbmischung entsteht sie durch die Mischung der Farben Rot und Grün.

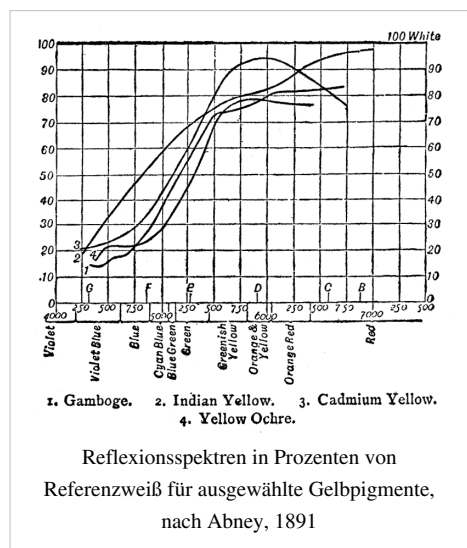
Bei der Farbmischung ist (ein) Violett die Komplementärfarbe zu Gelb, obwohl Maler durch die spezifischen Ausprägungen der gelben Farbmittel intuitiv Indigo oder Blauviolett als komplementär empfinden. In der Gegenfarbtheorie steht Blau als Gegenfarbe.

Farbsysteme

Der Farbbereich Gelb liegt um folgende Werte eines reinen Farbtons:

- RGB = (255, 255, 0) dezimal bzw. FFFF00 hexadezimal
- im HSV-Farbraum den Farbwinkel $H = 60^\circ$
- im Lab-Farbraum die Koordinaten (a, b) = (0, 127), beziehungsweise $H = 90^\circ$ in der Lab-Ebene

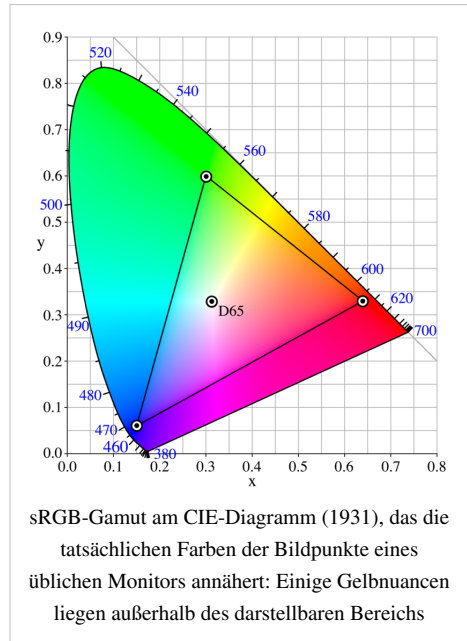
Im RAL-Farbsystem entsprechen Bezeichnungen RAL 1000 bis RAL 1037 gelben Farben, im PANTONE-Farbsystem 100-139 und 380-389, sowie einige Serienfarben.



Farbmischung

Ausmischungen von Gelb mit Rot ergeben Orangetöne, Mischungen mit Grün schon bei geringen Anteilen frische Grüntöne (*Frühlingsgrün*). Senkt man die Sättigung von Gelb, erhält man ein neutrales (Gelb-)Braun, und zwar schon bei kleinen Änderungen. Gelbe Farbmittel reagieren sehr heikel auf Verunreinigung. Ausmischungen in Weiß nennt man *Hellgelb* oder *Pastellgelb*, ab einem Anteil von der Hälfte in Weiß ergeben sich Naturfarben und gebrochenes Weiß (beige).

Am Bildschirm ist farbstarkes Gelb mit den Leuchtstoffen nur schlecht darstellbar. Zwar ergeben gelbe Bildpunkte wegen der additiven Farbmischung höhere Leuchtstärke, mithin Helligkeit, aber durch die substanzbedingte Lage der grünen Farbpunkte im CIE-Diagramm werden maximal 60 % Farbsättigung erreicht. Allerdings erreicht die Chrominanz 80 %, also relative Sättigung im Vergleich zur wellenlängengleichen Spektralfarbe. Insbesondere zitronengelbe Töne wirken – wie am obigen Farbmuster zu sehen – deshalb „schmutzig“



Im Farbdruck wird Gelb als Grundfarbe des CMYK-Farbraums (*Y* aus en: Yellow für Gelb) eingesetzt. Der enge Farbbereich wirkt hier weniger ungünstig da die verwendbaren Pigmente für die Prozessfarbtöne aufeinander abgestimmt sind. Allerdings ist im Vierfarbdruck die Darstellung reinster warmer Gelbtöne nicht möglich. Im Kunstdruck wird diese Kalamität mit Schmuckfarben gelöst. Die dafür nur durch die Druckeigenschaften begrenzte Pigmenta Auswahl bietet eine reichhaltigere Farbpalette.

Gelbtöne lassen sich mit optimalen Farbmitteln bis zu einer Sättigung von 95 % darstellen. Bei Blautönen sind mit Farbmitteln nur 60 % möglich.^[2]

Farbnuancen

Die drei typischen gelben Farbmittel sind *Cadmiumgelb* (PY35, giftig, frühes 19. Jh.), *Hansagelb* (PY1, PY3, eine Monoazoverbindung, *Arylidgelb*, bedenklich, seit 1909), und Produkte des Benzimidazolongelb (Hoechst, 1960). Sie sind in nahezu allen Tönen einsetzbar.

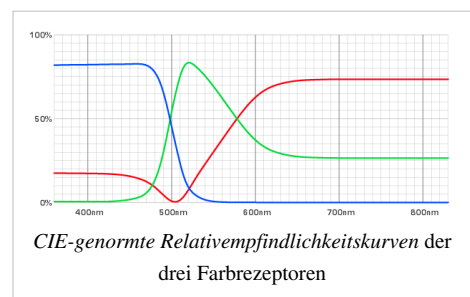
Eine Übersicht findet sich unter Liste gelber Farbstoffe und in Liste gelber Pigmente

Neutralgelb

Während die Rot-, Grün- und Blaubereiche im kontinuierlichen Spektrum *neutral* wirken, umfassen die Gelbtöne im Spektrum nur einen sehr engen Bereich, in dem sie *farbneutral* erscheinen. Die Auswahl des „richtigen“ Neutralgelbs war unter Farbtheoretikern lange eine Streitfrage.

- *Elementargelb* nach Helmholtz liegt bei 575 nm
- *Urgelb* nach der Prozesstheorie von Hering liegt bei 570 nm.^[3], also etwas näher an Grün.

An dem Punkt, wo die Reizantwort von den empfindenden M- und L-Zapfen gleich stark ist, müssen sich Grün- und Roteindruck abgleichen, damit der Eindruck Gelb entsteht. Die Reizantwort des S-Typs (Blaurezeptor) ist klein, aber nicht null. Beachtenswert ist dabei, dass sich an den reinen physiologischen Sehapparat noch eine psychologische und psychische Anpassung bis zur Wahrnehmung anschließt. Je nachdem, ob man diesen Aspekt berücksichtigt,



unterscheidet man (heute) in zwei grundlegende Neutralgelbs:

- *Primärgelb*
- *Prozessgelb*

Eine Darstellung solcher Unterschiede ist am Bildschirm nicht möglich. Das Gelb FFFF00 (*electric yellow*) entspricht allerdings durchaus einem Neutralgelb, wobei hier die passende Auswahl von Leuchtstoffen förderlich oder eben auch hinderlich sein kann.

Geschichtliche Betrachtung

Die meisten Menschen finden ein leicht warmes Gelb als „das typische Gelb“, so wie es auch für die Lab-Gegenfarbe *Mittelblau* zu beobachten ist.

Mittelgelb umfasst daher typischerweise LAB-Farbtöne $H = 80^\circ\text{--}90^\circ$

Bis zur Entdeckung, Herstellung und Nutzung von *Cadmiumgelb* ab 1825 war ein Neutralgelb nicht in voller Kraft darstellbar. Heute werden im Druckwesen primär Benzimidazolongelb (PY151 *Brillantgelb*, PY154) eingesetzt. Seit 1797 gibt es *Chromgelb* (PY34), das weniger farbstark ist. Seit Ende des 19. Jahrhunderts ist *Zinkgelb* beschaffbar, das ebenfalls einen blassen Gelbton hat. Alle diese historischen Pigmente sind giftig, und heute nur für künstlerische Zwecke in Gebrauch.

Allgemein ist für die synthetischen Pigmente der Handelsname *Permanentgelb*, der diverse neutralgelbe Substanzen und Mischungen umfasst.^[4]

Primärgelb, Reingelb

Primärgelb liegt exakt auf dem Schnittpunkt der L- und M-Kurven eines Normalbeobachters. Der Farbton ergibt sich nach dem ersten Graßmannschen Gesetz unmittelbar aus den drei von der CIE definierten *Primärvalenzen* R (700 nm), G (546,1 nm) und B (435,8 nm) anhand der CIE-Tristimulus-Werte.^[5] Tatsächlich liegt es, weil der (real vorhandene) Blauanteil vernachlässigbar ist, außerhalb des menschlichen Wahrnehmungsbereiches beim Lab-Farbwinkel $H = 90^\circ$

Primärgelb ist definitionsgemäß ein *visuell neutrales* Gelb, das weder warm noch kalt wahrgenommen wird, daher ist bei Künstlerfarben auch die Bezeichnung *Reingelb*^[6] üblich.

Prozessgelb, Eurogelb

Prozessgelb (auch *Optimalgelb*, *Pigmentgelb*, engl. *pigment Yellow*, *printer's yellow*) beruht auf einem (nur theoretischen) Farbmittel, das rotes und grünes Licht gleich stark reflektiert, und alles Blau absorbieren sollte. Der Name folgt aus der Anwendung als Grundfarbe des CMY-Farbsystems als *farbmetrisch* neutrale Grundfarbe.

Sein Lab-Farbwert ist etwa $H = 97^\circ$

Im Farbsystem nach DIN 6164 hat es den Referenzwert $T = 1$

PANTONE *Process Yellow* ist ein theoretisches Prozessgelb, das visuell deutlich grünstichig ist.

In Europa wird es als *Eurogelb* bezeichnet, da eine andere Standardisierung verwendet wird. Sie ist noch etwas grünstichiger. Der Farbton wird durch RAL 1016 *Schwefelgelb* dargestellt, das häufig bei Fahrzeugen des Rettungsdienstes verwendet wird.

Dem Vierfarb-Farbdrucks liegt das CMYK-Farbmodell zugrunde, mit zusätzlichem Prozessschwarz als Grundfarbe. Die drei bunten Farben können so deutlich heller ausgeprägt sein als das farbmetrisch korrekte Prozessgelb. Auf diesen Farbton nimmt PANTONE 803 Bezug (im Original ist diese Farbe bei den Farbkontrollstreifen zu betrachten).

Zitronengelb, Schwefelgelb

Farben zwischen 575 nm *Primärgelb*, also einschließlich Prozess- und Eurogelb, und 560 nm *Gelbgrün* bezeichnet man nach der Schale der Zitronenfrucht oder dem gelben Schwefel

Während es für die nahe dem Neutralgelb stehenden Nuancen $H = 90^\circ$ bis $= 100^\circ$ Pigmente gibt, klafft in der Palette bis etwa $H = 135^\circ$ *Phthalocyanin-Gelbgrün* eine Lücke, in der kein farbstarkes Pigment existiert. Sehr kühle Gelbtöne müssen durch geeignete Kombinationen von gelben und grünen oder blauen Farbmitteln ermischt werden.

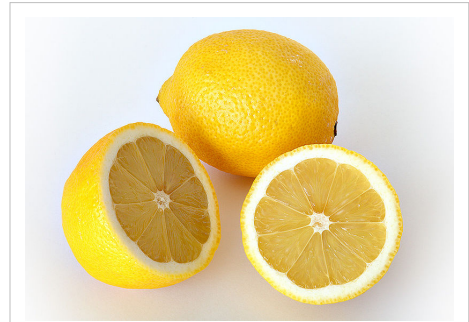
Als reine Farbmittel existieren hier:

- *Kadmiumzitron* (grünstichiges Kadmiumgelb), *Hansagelb hell*, *Praesodymgelb* (PY159, in Spinellmischphase) oder *Bismutgelb* (*Vanadiumgelb*, PY184)

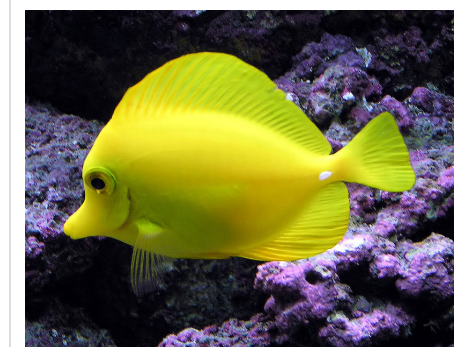
Typische Farbnamen sind in diesem Nuancenbereich:

- *Kanariengelb*, *Leuchtgelb* RAL 1026, *Lemon* (engl.), *Zitronengelb* RAL 1012, *Zinnobergrün* (lasierende Ölfarbe)
- im Englischen steht für kühles Gelb *light yellow*, nicht mit „hell“, sondern allenfalls mit „Leucht-“ oder „Licht-“ zu übersetzen.

Nach der *UNECE Regulation No. 37* waren die Frontscheinwerfer von Kraftfahrzeugen auf Weiß und Gelb beschränkt, in Frankreich waren gelbe Scheinwerfer bis 1993 Vorschrift. Der Vorteil wurde in der besseren Erkennung bei schlechten Sichtverhältnissen gesehen. Genormter Farbton dafür war *Selektivgelb*.



Ganze und aufgeschnittene Zitrone



Gelber Segelflossendoktor (*Zebrafish* *flavescens*)

Goldgelb

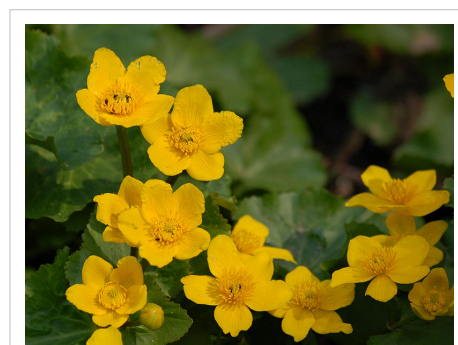
Rotstichige, warme Gelbs heißen *Goldgelb* oder *Goldfarben*, farbintensive Töne *Königsgelb*, auch *Sonnenblumengelb*, *Dottergelb* und ähnliche vergleichende Trivialnamen werden benutzt. Wie auch gediegenes Gold in den Varianten (je nach Legierungsbestandteil) *Gelbgold* und *Rotgold* geführt wird, kann man diese Farbtongruppe mit dem Spektralbereich von 575 nm bis etwa 590 nm, bei dem sich der Übergang zu Gelborange vollzieht, ansetzen.

Für die Wiedergabe von Goldgelb steht eine breite Palette an Pigmenten und Farbmitteln zur Verfügung:

- *Aureolin* (*Kobaltgelb*, PY40), *Barytgelb* (Bariumchromat PY31), *Nickeltitangelb* (PY53)

Traditionelle Pigmente mit jahrhundertealter Tradition, aber teils auch giftig, sind:

- *Bleizinnigelb*, *Massikot* (Blei(II)-oxid), *Orpiment* (Arsen(III)-sulfid), *Neapelgelb*, *Schüttgelb*
- Safran (*Crocus sativus*, Farbstoff: Crocetin, *Kaisergelb* Chinas), Gelbwurz (*Curcuma longa*), Gamboge (*Garcinia hanburyi*), Wau (*Reseda luteola*, Farbstoff: Luteolin)
- *Indischgelb* aus dem Harn des Rindes, wird seit 1921 nicht mehr gehandelt. Es galt lange Zeit als einzigartiges Goldgelb und kann bis heute in seiner Farbtiefe nicht ersetzt werden.
- Das typische *Ocker* deckt ein weites Feld zwischen farbschönen aber nicht zu bunten gelben und rötlichgelben Nuancen bis zu warmem Braun ab.



Sumpfdotterblume (*Caltha palustris*)

Weitere Farbnamen sind:

- Für warmes Gelb: *Goldgelb* RAL 1004, W3C^[7], *Narzissengelb* RAL 1007, *Kadmiumgelb* (ehem. RAL 1021), *Rapsgelb* RAL 1021, *Safrangelb* RAL 1017, *Senfgelb*, *Signalgelb* RAL 1003, *Sonnengelb* RAL 1037, *Verkehrsgelb* RAL 1023
- Für orangestichiges Gelb: *Dahliengelb* RAL 1033, *Indischgelb*, *Ginstergelb* RAL 1032, *Melonengelb* RAL 1028

Gebrochenes Gelb

- Gelb und Schwarz (also entsättigtes und dunkles Gelb) ergibt Braun in allen möglichen Varianten, Ocker (neutral bis rötlich) und Umbra (grünlich-gelb). Die Ausmischung von Neutralgelbs mit Schwarz ergibt die Oliv-Gruppe
- Gelb und Weiß (entsättigtes und helles Gelb) ergibt Pastelltöne, etwa *Pastellgelb* (RAL 1035), oder noch heller diverse *Naturfarben* (*Beige*, *Elfenbein*, und so fort).
- Gelb, Weiß und Schwarz (also graustichige, nur in Sättigung verringerte Gelbs) sind von schwer zu beschreibender Farbe. RAL führt hier *Graubeige* RAL 1019.

Weitere besondere Farbnamen für gelbe Farbtöne:

- Blond ist ein Name für gelblich-bräunliche Haarfarbe

Signalfarbe

Gelb hat starke Signalwirkung und will aufmerksam machen. Die gelbe Raute des Vorfahrtszeichens ist eines der wenigen deutschen Verkehrszeichen mit Gelbanteilen.

Kennzeichnungen nach EN und DIN:

- RAL 1003 *Signalgelb*: Warnzeichen – DIN 4844, DIN 5381
- RAL 1018 *Goldgelb*: Schulterfarbe für Gasflaschen mit giftigem oder korrosivem Inhalt – DIN EN 1089-3
- RAL 1021 *Rapsgelb*: Leitungen mit brennbarem und verflüssigtem Gas – DIN 2403
- RAL 1023 *Verkehrsgelb*:



Gelb-Schwarz

Gelb in Kombination mit Schwarz (sozusagen kein Gelb) ist in der Natur eine Warnfarbe, was wohl auf dem Kontrast zwischen „Hell“ und „Nicht-Hell“ beruht. Für giftige Tiere ist diese Färbung typisch – sie signalisiert potentiellen Fressfeinden: „keine brauchbare Beute“. Beispiele sind Bienen, Hummeln, Wespen oder der Feuersalamander. Schwebfliegen oder Hornissenschwärmer nutzen die Warnfarbe zur Mimikry, ohne selbst giftig zu sein.

Diese Signalwirkung betrifft auch den Menschen: In Kombination mit Schwarz wird allgemein die größtmögliche Signalwirkung zweier Farben erreicht, wobei das stark wirkende Gelb besonders geeignet ist. Verwendet wird diese Farbkombination daher zum Beispiel für Warnzeichen vor Gefahren (wie Hochspannung) und das Blindenzeichen.

Rot-Gelb-Grün

Als Einzelfarbe hat Rot den höheren Signalwert, Gelb ist eine Vorstufe. Die drei Ampelfarben werden so verwendet: Die mittlere Phase zeigt standardisiert in europäischen Staaten den bevorstehenden Wechsel von grün nach rot an, in manchen Ländern zusätzlich auch umgekehrt.

Im Sport (insbesondere Fußball) ist Gelb die Verwarnung eines Spielers, die noch nicht unmittelbar zum Platzverweis führt: *Gelbe Karte*.

Postgelb

Schwarz-Gelb war die Wappenfarben der Familie Thurn und Taxis. Weil ihr lange die Briefzustellung oblag, ist Gelb bis heute die Postfarbe in deutschsprachigen Ländern.

Postgelb ist:

- Das historische Pigment *Chromgelb* PY34, das Blei(II)-chromat, RAL 1007 *Narzissengelb*
- RAL 1004 *Goldgelb*, Farbe der Schweizerischen Post
- RAL 1021 *Rapsgelb*, Farbe der Österreichischen Post, auch RAL 1033 *Dahliengelb* für Postbus
- RAL 1032 *Ginstergelb*, Farbe der deutschen Post



Gelb ist die Farbe vieler Postbetriebe, hier ein Schweizer Briefkasten

Kennfarben


- *Gelbe Seiten* (nach Branchen sortierte Telefonverzeichnisse)
- *Gelbe Tonne* (Sammelbehälter für Kunststoffabfälle)
- *Gelbkreuz* (Gaskampfstoff im Ersten Weltkrieg, nach der Farbe des Markierungszeichens)

Symbolische Bedeutung

Gelb vertritt häufig die Stelle der Farbe des Metalls Gold. In dieser Form gilt sie auch für Wappen und Flaggen, vergleiche dazu die Staatsflagge Schwarz-Rot-Gold, die mit je einem Streifen schwarzen, roten und gelben Stoffes wiedergegeben wird.

- **Goldgelb** symbolisiert Allgemein die Ewigkeit.
- In der traditionellen abendländischen Kultur gilt Gelb – in Assoziation zu Gold – als negativ besetzt:
 - Neid: Redensart *Gelb ist der Neid*, wie auch Grün
 - Gier
 - christliche Symbolik die Farbe des Judas
 - christliche Farbe für Ketzerei
 - Dekadenz (Yellow Book)
- Im Mittelalter war in vielen Ländern jüdischen Bürgern ein gelber Ring oder Fleck als Kennzeichnung vorgeschrieben. Diese Symbolik wurde im Holocaust des 20. Jahrhunderts für den Judenstern wieder aufgegriffen.
- Gelb ist (fast nur) in Deutschland und Österreich die Farbe der liberalen Partei.
- Gelbe Gewerkschaften hießen und heißen in der Arbeiterbewegung Gewerkschaften, die in einzelnen Unternehmen mit Begünstigung der Firmenleitung entstanden, um diese von roten (sozialistischen) Gewerkschaften abzugrenzen.
- Der führende Radrennfahrer der Tour de France trägt ein gelbes Trikot.

- Im Angelsächsischen steht *Gelbe Presse* für Klatschpresse (englisch: *yellow press*), bezogen auf die Aufmachung dieser Blätter.
- Die Gelbe Schleife (*yellow ribbon*) gilt in der Kultur der USA (und in neuerer Zeit auch in anderen Ländern) als Zeichen der Verbundenheit mit den fern von Zuhause kämpfenden Soldaten. Der Brauch geht wohl auf die Puritaner zurück, deren Truppen während des Englischen Bürgerkrieges gelbe Bänder trugen.
- In **China** (siehe dazu auch Chinesische Symbole)
 - symbolisiert die Farbe den Kaiser: nur er durfte Gelb (Gold) als Kleidung tragen
 - und das Land selbst, die Erde: in Assoziation zu den fruchtbaren Lößebenen Zentralchinas, siehe Gelber Fluss, die Mitte.
 - Weiter steht Gelb für Ruhm und Fortschritt.
 - In jüngerer Zeit haben sich negative Konnotationen der Dekadenz etabliert:
 - *Gelbe Musik* steht aus Sicht des Regimes für obszöne Musik,
 - *Gelbe Literatur* oder
 - *Gelber Film* ist ein chinesischer Euphemismus für Pornographie.
- In Thailand ist gelb die Farbe des Königshauses. Anlässlich des 60. Thronjubiläums von König Bhumibol im Jahr 2006 trugen die meisten Thailänder ein gelbes Kleidungsstück oder ein gelbes Band, um ihre Sympathie mit dem König zu demonstrieren.
- Die *Gelbe Kirche*, *Gelbmützen* sind eine Richtung des Lamaismus, nach der Farbe der Hüte der Mönche im Unterschied zu den Rotmützen
- „Gelb“ war auch eine Umschreibung der Hautfarbe der als „mongolide Rasse“ bezeichneten Ethnien.
- Gelbe Gefahr: In der Zeit des kalten Krieges nach dem Koreakrieg war die *gelbe Gefahr* ein im Westen propagierter Slogan gegen die Bedrohung aus Asien, insbesondere durch die Volksrepublik China.
- *gelber Tiger* wird für diese Schwellenländer als *Tigerstaat* verwendet.

Farbe	Assoziationen und Gefühle
 Gelb	Zitrone – Frische – Fröhlichkeit – Lebensfreude – Lebenskraft – Liberalismus – Neid – Hass – Eifersucht <ul style="list-style-type: none"> • als Signalfarbe: eingeschränkt, teilweise, Zwischenzustand, Warnung (siehe Warnfarbe) • in China: Erde, Mitte, Ausgeglichenheit

Sport

- Die gelbe Karte wird als Zeichen der Verwarnung im Fußball eingesetzt. Diese Bedeutung existiert seither auch im allgemeinen Sprachgebrauch.
- Der gelbe Gürtel kennzeichnet die Kampfsportkleidung eines unteren Schülergrades (jap. Kyu-Grad) in Kampfsportarten wie Jiu Jitsu, Ju-Jutsu, Judo und Karate.

Heraldik

In der Heraldik (Wappenkunde) kann beim Wappenmalen die heraldische Tinktur *Gold*, das als Metall bezeichnet wird, durch *Gelb* ersetzt werden. Siehe Gold (Farbe)



Siehe auch

Den Farbton beschreibend für:

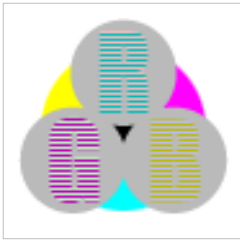
- Wasser: *Gelbes Meer* (Teil des Ostchinesischen Meers)
- menschliche Hautfärbung und andere Organe:
 - *Gelbfieber* (Infektionskrankheit in tropischen Ländern),
 - *Gelbsucht* (Erkrankung),
 - *Gelber Fleck* (Stelle der Netzhaut),
 - *Gelbkörper* (Inkretdrüse weiblicher Säugetiere)
- Tiere:
 - *Gelbrandkäfer* (Schwimmkäfer),
 - *Gelbspötter* (Singvogel),
 - *Gelber Buntbarsch* (*Labidochromis caeruleus*),
 - Taxone mit dem Beinamen *caeruleus*, siehe dazu Gold (Farbe)
- sowie
 - *Gelbling*, für die Pilzart Pfifferling
 - Gelbrost, durch Pilze verursachte Erkrankung des Getreides, in Unterscheidung zu anderem „Rost“-Befall
- Gelbfilter, fotografischer Filter zur Filterung der gelben Lichtanteile

Literatur

- Bruce MacEvoy: *yellow* ^[8]. In: *Handprint. Watercolors*. www.handprint.com, abgerufen am 15. Januar 2009 (engl.).
- Katholisches Institut für Medieninformation und Katholische Filmkommission für Deutschland (Hrsg.): *film-dienst 18/02 thema Gelb*. Nr. 18, KIM Katholisches Institut für Medieninformation, Köln 2002, ISSN 0720-0781 ^[8].
- Kurt Wehlte: *Werkstoffe und Techniken der Malerei*. Otto Maier, Ravensburg 1967. ISBN 3-473-48359-1 (früher: ISBN 3-473-61157-3) – Kapitel 1.482 *Gelbe Farbmittel*, S. 92–110
- Thomas Seilnacht: *Die Farbe Gelb* ^[9]. Online-Dokument auf: www.seilnacht.com

Einzelnachweise

- [1] Franz Wenzel: *AGFA-Lichtfilter*. fotokino-verlag, Halle 1957
- [2] – Bruce MacEvoy: *Color Vision*. In: CIE a* b* plane (<http://www.handprint.com/HP/WCL/labwheel.html>)
- [3] *The geometry of color perception. Hering's opponent processes* (<http://handprint.com/HP/WCL/color2.html#heringtheory>) – MacEvoy: *Color Vision*.
- [4] *Guide to watercolor pigments. Yellow* (<http://handprint.com/HP/WCL/waterfs.html>) – MacEvoy: *Handprint. Paints*.
- [5] Arbeiten von Leo Hurvich, Dorothea Jameson: 1955, 1957, sowie *Complexities of Perceived Brightness*. In: *Science* 133/3447 01/1961, S. 174–179
- [6] Farbmuster nach Farbton 216 (http://www.schmincke.de/data/content/de/de_farben.php?sorte=14&artnr=216), H. Schmincke & Co. GmbH & Co. KG (12. August 2006)
- [7] Spezifikation CSS-3/SVG 1.0 des W3C, siehe Webfarbe#CSS 3
- [8] <http://www.handprint.com/HP/WCL/watery.html>
- [9] <http://www.seilnacht.com/Lexikon/Gelb.htm>



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Glühlampe

Die **Glühlampe** oder **Glühfadenlampe** (früher *Glühlicht*) ist eine künstliche Lichtquelle. Umgangssprachlich werden Glühlampen auch als **Glühbirnen** bezeichnet. In der Glühlampe wird ein elektrischer Leiter durch elektrischen Strom aufgeheizt und dadurch zum Leuchten angeregt. Die weit verbreitete Bauform der Glühlampe mit Schraubsockel wird fachsprachlich als *Allgebrauchslampe* bezeichnet (abgekürzt *A-Lampe* oder *AGL*).

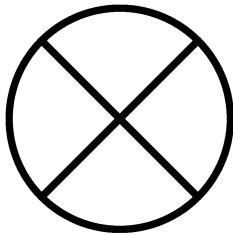
Sie wird heute sehr oft noch zur Wohnraumbeleuchtung eingesetzt. In der Europäischen Union, Australien und einigen anderen Ländern ist aus Energiespargründen ein Herstellungs- und Vertriebsverbot von Glühlampen mit geringer Energieeffizienz (Energie label E, F und G) geplant oder schon beschlossen.



Glühlampe mit E27-Sockel 230 V,
100 W, Energieeffizienzklasse G



Halogen-Xenon-Glühlampe mit
E27-Sockel 230 V, 105 W,
Energieeffizienzklasse C (konform
zur seit 1. September 2009 gültigen
Ökodesign-Norm der
EU-Verordnung 244/2009)^[1]



Schaltsymbol Lichtquelle

Funktionsprinzip

In einer Glühlampe wird ein elektrischer Leiter als Glühfaden oder Glühwendel durch Stromfluss, mithin joulescher Wärme, so stark erhitzt, dass er glüht, das heißt, er emittiert Wärmestrahlung sowie sichtbares Licht. Das Aussenden von Photonen wird dabei durch Gitterschwingungen im Metall (dem Glühfaden) hervorgerufen.

Die aufgenommene elektrische Leistung wird nur zum geringeren Teil in Form von sichtbarem Licht abgestrahlt. Der größte Teil wird im Infraroten abgestrahlt und mittels Wärmeleitung und -konvektion an Füllgas und Glaskolben sowie über Wärmeleitung an die Zuleitungs- und Haltedrähte der Glühwendel abgegeben. Der Anteil des sichtbaren Lichts erreicht maximal 5 %.

Aufbau

Die Glühlampe besteht aus einem Befestigungssockel einschließlich der elektrischen Stromzuführungen im Quetschfuß und einem Glaskolben, der den Glühfaden und dessen Halterung vor der Außenumgebung abschirmt.

Befestigungssockel

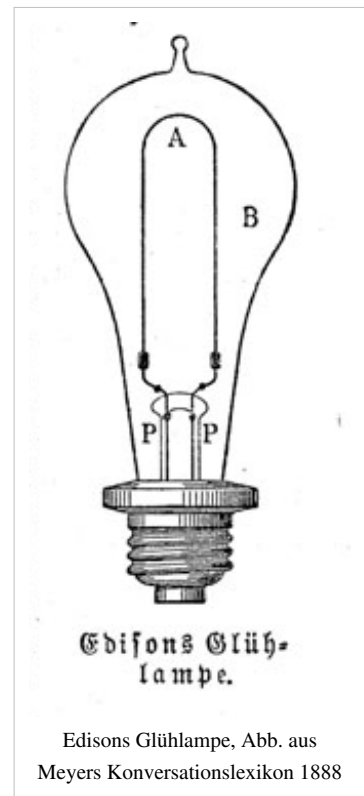
Als *Befestigungssockel*, *Lampensockel* oder *Lampenfassung* wird die mechanische Halterung von Glühlampen bezeichnet, die auch den elektrischen Kontakt herstellt.

Glaskolben

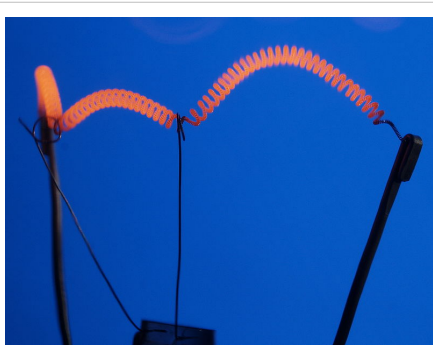
In normaler Umgebungsluft würde der Glühfaden aufgrund des Sauerstoffs und der hohen Betriebstemperaturen sofort zu Wolframoxid verbrennen, deshalb wird er durch den Glaskolben von der Umgebungsluft abgeschirmt. Da während des Betriebs ständig Metall vom Glühfaden abdampft, richtet sich die Größe des Kolbens im Wesentlichen nach der Sublimationsrate des Drahtmaterials. Konventionelle Glühlampen bzw. Glühlampen mit hoher Leistung benötigen einen großen Glaskolben, damit sich der Niederschlag auf einer größeren Fläche verteilen kann und die Transparenz des Glaskolbens während der Lebensdauer der Lampe nicht allzu sehr eingeschränkt.



Glühlampe für 230 V mit 40 Watt
Leistungsaufnahme, klarem
Glaskolben und einem Edisonsockel
E14



Edisons Glühlampe, Abb. aus
Meyers Konversationslexikon 1888



Doppelwendel einer 200-Watt-Glühlampe mit Stromzuführung und zwei stromlosen Haltedrähten (Mitte)

Schutzgas

Früher wurde der Glaskolben evakuiert. Heute sind die Glühlampen mit einem Schutzgas gefüllt. Das vereinfacht die Herstellung und reduziert die Sublimationsrate. Die bei einer Gasfüllung auftretenden Wärmeverluste durch Wärmeleitung und Konvektion begrenzt man durch die Wahl von möglichst schweren Inertgasmolekülen oder -atomen. Stickstoff-Argon-Gemische sind ein Zugeständnis an die Herstellungskosten. Teure Glühlampen enthalten Krypton oder Xenon, was eine stärkere Erwärmung ermöglicht.

Glühfaden

Die ersten patentierten Glühlampen in den 1840er-Jahren hatten Glühfäden aus Platin. Aus diesen Entwicklungen wurde allerdings kein Produkt. Erst bei Temperaturen knapp unter dem Schmelzpunkt von Platin von $1772\text{ }^{\circ}\text{C}$ wurde eine akzeptable Lichtausbeute erzielt. Die exakte Temperatursteuerung für haltbare Glühfäden erwies sich als zu schwierig. Edison gab diesen Technikansatz auf.

Die ersten kommerziell hergestellten Glühlampen enthielten einen Faden aus Kohle mit einem Sublimationspunkt von $3550\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Verkohlung von natürlichen dünnen Fasern schnellwachsender tropischer Pflanzen wie Bambus war geeignet. Der Herstellungsprozess ist wesentlich komplexer als die Herstellung dünner Fäden aus Platin. Ferner erfordert der Betrieb von Kohlefäden ein stärkeres Vakuum im Glaskolben. Kohlenfadenlampen sind heute noch erhältlich. Das leicht rötliche Licht und das sanfte Ansteigen der Helligkeit beim Einschalten wird oft als angenehm empfunden.

Bei der um 1900 gebräuchlichen Nernstlampe wurde der Ionenleiter Zirkonium(IV)-oxid (mit Zusätzen) verwendet. Später wurden Tantal oder Osmium verwendet. Heute kommen fast ausschließlich Drahtwendeln aus Wolfram (Schmelzpunkt: $3422\text{ }^{\circ}\text{C}$) zum Einsatz. Alle in Frage kommenden Materialien sind aufgrund ihrer hohen Schmelztemperatur und ihrer Sprödigkeit schwierig zu verarbeiten. Der Draht ist oft doppelt gewandelt, um durch eine kleine Langmuirschicht (Irving Langmuir, Nobelpreis 1932) die Wärmekonvektion zu begrenzen.



Glühlampe mit E40-Sockel und großem Glaskolben für 235 V mit 500 Watt Leistungsaufnahme. Gebraucht, funktionsfähig, Standzeit ca. 5 Jahre. Kleine E27-Sockel Glühbirne zum Vergleich.

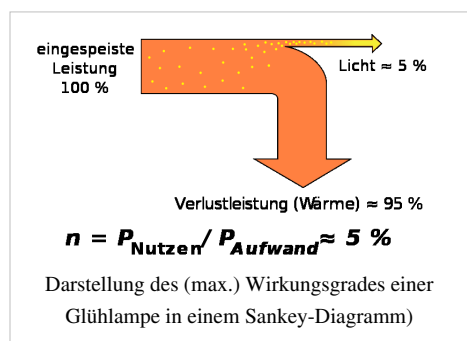
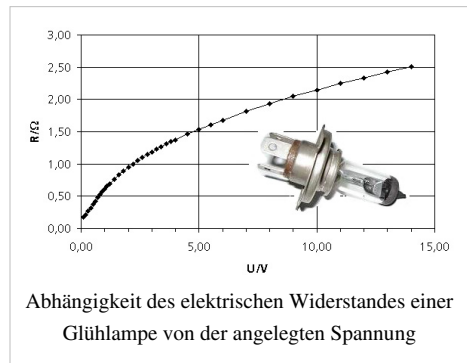
Elektrische Eigenschaften

Einschaltstrom

Aufgrund der positiven Temperatur-Widerstands-Charakteristik (Kaltleiter) fließt beim Einschalten einer Metalldraht-Glühlampe ein sehr hoher Einschaltstrom (das Fünf- bis Fünfzehnfache des Nennstromes), der die Glühwendel schnell auf die Betriebstemperatur aufheizt. Mit der Zunahme des elektrischen Widerstands bei steigender Temperatur sinkt der Strom auf den Nennwert. Die früher gebräuchlichen Kohlenfadenlampen zeigten dagegen eine sanfte Zunahme des Stromes beim Einschalten, da erst mit steigender Temperatur genügend Ladungsträger für den Stromtransport freigesetzt werden (Kohle ist ein Heißeiter).

Der hohe Einschaltstrom ist die Ursache für Ausfälle von Glühlampen unmittelbar beim Einschalten (siehe unten). Dabei kann (bei höheren Betriebsspannungen) ein Lichtbogen zünden, was zum Auslösen der Sicherung und/oder zum Bersten des Glaskolbens führen kann. Manche Glühlampen für Netzspannung sind daher im Sockel mit einer Schmelzsicherung versehen.

Der hohe Einschaltstrom von Metalldrahtglühlampen belastet das Energieversorgungssystem des Leuchtmittels. In Kühlräumen ist das Verwenden von Halogenlampen ohne entsprechende Strombegrenzungen wegen der hohen Einschaltströme bei tiefen Temperaturen problematisch.



Optische Eigenschaften

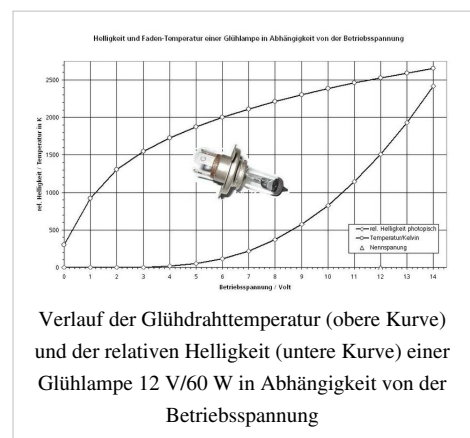
Lichtausbeute

Fast die gesamte der Lampe zugeführte Energie wird in Strahlung umgesetzt, die Verluste durch Wärmeleitung und -konvektion sind gering. Aber nur ein kleiner Wellenlängenbereich der Strahlung ist für das menschliche Auge sichtbar. Der Hauptanteil liegt im unsichtbaren Infrarotbereich und wird als Wärme abgestrahlt.

Der Glühfaden strahlt mit einer Wellenlängenverteilung entsprechend dem planckschen Strahlungsgesetz. Das Lichtspektrum ist im Gegensatz zu vielen anderen Lichtquellen kontinuierlich. Das Strahlungsmaximum der Strahlung verschiebt sich mit steigender Temperatur gemäß dem Wienschen Verschiebungsgesetz zu kleineren Wellenlängen hin. Zugleich erhöht sich das Maximum. Die Helligkeit einer Glühlampe hängt daher stark überproportional von der Temperatur und der Betriebsspannung ab.

Um eine möglichst hohe Lichtausbeute zu erhalten, strebt man danach, das Strahlungsmaximum durch Temperaturerhöhung aus dem Bereich der langwelligen Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung) in den Bereich des sichtbaren Lichtes zu verschieben.

Die Lichtausbeute (Anteil sichtbaren Lichts) erreicht bei einer Glühfadentemperatur von etwa 2700 K einen Anteil von etwa 3 %. Erhöht man die Temperatur auf 3400 K, so beträgt die Ausbeute 5 %. Die dazu erforderliche höhere Betriebsspannung (siehe dort) führt jedoch zu einer verkürzten Lebensdauer.



Die Höchsttemperatur wird allerdings durch die Eigenschaften des Glühfadenmaterials begrenzt. Um möglichst hohe Temperaturen zu ermöglichen, verwendet man heute für Glühfäden das hochschmelzende Metall Wolfram (Schmelztemperatur $3422 \pm 15^\circ\text{C}$), früher auch Osmium oder Kohle. Allerdings lässt sich auch mit diesem Material die für tageslichtähnliches Licht wünschenswerte Farbtemperatur von etwa 6200 K nicht erreichen, da Wolfram bei dieser Temperatur sogar bereits gasförmig (Siedetemperatur 5660°C) ist. Selbst wenn das gelänge, betrüge die Lichtausbeute aufgrund des breiten emittierten Wellenlängenbandes nur weniger als 15 %.

Lichtspektrum und Farbtemperatur

Glühlampen geben mit Farbtemperaturen von etwa 2300 K bis 2900 K ein Licht ab, das deutlich gelb-rötlicher als das natürliche Tageslicht ist. Tageslicht liegt je nach Sonnenschein bei 5000 K bis 7000 K. Andere Lichtquellen mit dieser typischen Farbtemperatur von Glühlampen (Energiesparlampen, Leuchtstofflampen und LED-Lampen) werden als „Warmton“ angeboten, haben aber im Gegensatz zu Glühlampen kein kontinuierliches Lichtspektrum, weshalb sie dennoch nicht denselben starken Rot- und Gelbanteil bieten.

Die Glühfadentemperatur entspricht nicht der Farbtemperatur des abgestrahlten Lichts, da Wolfram kein idealer Schwarzer Körper ist; Die Farbtemperatur ist um etwa 60 bis 80 Kelvin höher als die Glühfadentemperatur (im Temperaturbereich üblicher Glühlampen).^[2]

Die Bevorzugung von „Warmton“ als Beleuchtung mit starken Rot- und Gelbanteilen ist eine kulturelle Eigenart nördlicher Länder. Im Mittelmeerraum und in den Tropen werden kältere Lichtfarben mit höheren Blau- und Grünanteilen bevorzugt, was die Akzeptanz von Energiesparlampen erleichtert. Bei Energiesparlampen erzeugen meistens Leuchtstoffe aus Ultraviolettstrahlung sichtbares Licht. Auch bei einer Zusammensetzung der Leuchtstoffe für „warmweißes“ Licht wird nicht jede Nuance des Farbspektrums zwischen Rot und Blau erzeugt. Menschen nehmen das veränderte Aussehen farblich abgestimmter Accessoires in ihrer Wohnung wahr, was zu einer Ablehnung von Energiesparlampen führen kann. Eine bessere Abdeckung des Farbspektrums durch die Leuchtstoffe führt beim derzeitigen Technikstand zu einer geringeren Lichtausbeute, was den beabsichtigten Energiespareffekt reduziert.^[3]

Leuchtdichte

Die Leuchtdichte des Glühdrahtes einer Glühlampe beträgt 5 bis 36 Mcd/m^2 ^[4], wird aber von anderen künstlichen Lichtquellen (zum Beispiel Hochdruck-Gasentladungslampen, Kohlebogenlampen, LEDs) übertroffen. Glühlampen eignen sich daher gut für Anwendungen, bei denen das Licht gebündelt werden muss, was z. B. für Projektoren und Scheinwerfer zutrifft. Die wirksame Leuchtdichte lässt sich durch die Gestaltung des Glühfadens (Doppelwendel, Flachwendel) weiter erhöhen. Generell besitzen dicke Glühdrähte (für niedrige Betriebsspannungen) höhere wirksame Leuchtdichten als dünne Glühdrähte.

Lichtmodulation

Aufgrund der thermischen Trägheit des Glühfadens weisen auch an netz- bzw. niederfrequenter Wechselspannung betriebene Glühlampen nur geringe Schwankungen der Helligkeit auf. Die Helligkeitsmodulation mit der doppelten Betriebsfrequenz ist umso stärker, je dünner der Glühfaden ist. Sie ist also besonders bei Lampen geringer Leistung für Netzspannung ausgeprägt und beträgt bei einer Glühlampe 15W/230V etwa 30%.

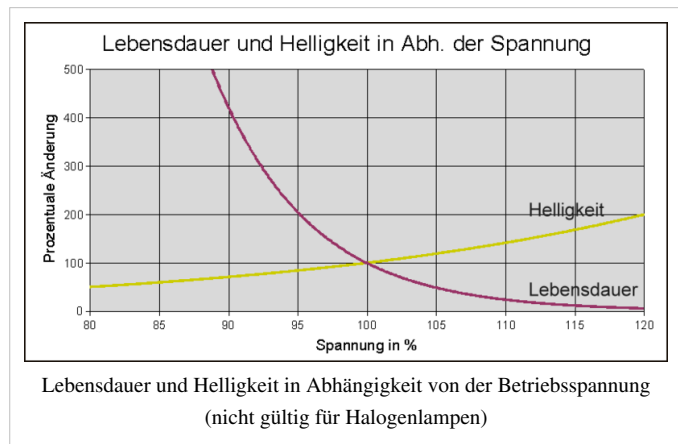
Insbesondere Niederspannungs-Glühlampen gelten aufgrund ihrer dicken, thermisch trägen Glühdrähte als flimmerfrei – ein Vorteil bei der Beleuchtung von rotierenden Maschinen. Glühlampen mit sehr dünnem Glühfaden für Betriebsströme von weniger als 0,1 A können mit Frequenzen bis zu einigen 100 Hz moduliert werden und wurden früher in Bastelprojekten zur Sprachübertragung verwendet.

Die langsame Helligkeitszunahme geschalteter Niederspannungs-Glühlampen ist zwar beim Einsatz als Beleuchtung angenehm, gilt aber bei sicherheitsrelevanten Anwendungen wie Verkehrsampeln oder Bremsleuchten gegenüber den hier zunehmend eingesetzten Leuchtdioden als nachteilig. Allerdings werden deren abrupte Helligkeitswechsel

wie auch die bei schneller Augen- oder Kopfbewegung sichtbare Pulsweitenmodulation (typisch für Bremslicht/Rücklicht-Kombinationen) von Verkehrsteilnehmern als unangenehm empfunden.

Lebensdauer

Die Lebensdauer einer Glühlampe fällt mit steigender Lichtausbeute durch die höhere Glühfadentemperatur drastisch ab. Bei 2700 K erreichen konventionelle Glühlampen eine Standzeit von etwa 1000 Stunden, bei 3400 K (Studiolampen) von nur wenigen Stunden. Wie das Diagramm zeigt, verdoppelt sich die Helligkeit, wenn man die Betriebsspannung um 20 % erhöht. Gleichzeitig reduziert sich die Lebensdauer um 95 %. Eine Halbierung der Betriebsspannung (zum Beispiel durch Reihenschaltung zweier gleichartiger Glühlampen) verringert demnach zwar den Wirkungsgrad, verlängert aber die Lebensdauer um mehr als das Tausendfache.



Sind die Kosten für das Auswechseln einer Lampe hoch, so kann zu Gunsten einer höheren Lebensdauer auf eine hohe Lichtausbeute verzichtet und die Betriebsspannung abgesenkt werden. In Geräten eingebaute Lampen sind meist umständlich zu wechseln. Hier sollte für die Glühlampen eine deutlich niedrigere Betriebsspannung als die Nennspannung der Lampen angesetzt werden.

Die Lebensdauer einer Glühlampe wird meist nicht durch gleichmäßiges Abdampfen von Wendelmaterial bestimmt, sondern durch das Durchbrennen an einer Stelle. Grund ist eine Instabilität, die mit der Zunahme des elektrischen Widerstandes mit der Temperatur zusammenhängt: Stellen des Glühfadens, die nur wenig dünner sind und sich beim Einschalten zunächst nur aufgrund der höheren Stromdichte schneller aufheizen, haben dann auch noch aufgrund ihrer Übertemperatur einen höheren Widerstand, heizen sich kurzzeitig extrem auf und verlieren dabei etwas Material durch Verdampfen. Beim nächsten Einschalten verschärft sich das Problem. Beim letzten Einschalten kann von der Unterbrechungsstelle sogar eine Bogenentladung im Füllgas ausgehen.

Um Überströme durch solche Bogenentladungen gerade durchgebrannter oder anders innen kurzgeschlossener Glühlampen zu limitieren, haben viele 230-Volt-Glühlampen – im Glasfuß sichtbar – eine Schmelzsicherung im dünnen Glasröhrchen eingebaut. Der duroplastische Kitt zwischen Birnenglas und Metallgewindefuß ist porös und ausreichend hitzebeständig. Das Lot zur Kontaktierung beider Pole an einen billigeren Schraubsockel aus Aluminium- statt Messingblech verlangt nach einer besonderen Lotlegierung.

Eine Möglichkeit, die Lebensdauer zu verlängern, ist daher die Begrenzung des Einschaltstroms oder die in der Veranstaltungstechnik häufig angewandte *Vorheizung* (engl. *Pre Heat*) durch einen permanenten Stromfluss knapp unterhalb der Leuchtschwelle. Die Ausfallwahrscheinlichkeit von Glühlampen lässt sich durch eine Exponentialverteilung oder, mit Berücksichtigung der Historie, durch eine Weibullverteilung beschreiben.

Kompromiss zwischen Lebensdauer und Lichtausbeute

Die Dimensionierung von Glühlampen bei gegebener Betriebsspannung ist ein Kompromiss zwischen Lebensdauer und Lichtausbeute und ergibt sich neben den technologischen Fähigkeiten der verschiedenen Hersteller wesentlich aus der vorgesehenen Anwendung.

Heute unterscheidet sich die angegebene Lebensdauer von Allgebrauchs-Glühlampen verschiedener Hersteller wenig. Es werden Lampen für 1000 und für 2000 Stunden angeboten. Halogenglühlampen werden für 2000 bis 6000 Stunden angeboten. Bei gleicher Leistung haben Glühlampen für geringere Nennspannung einen dickeren Glühfaden und damit eine höhere Lebensdauer. Die tatsächlich erreichte Lebensdauer hängt jedoch deutlich von den Einsatzparametern ab:

- genaue Einhaltung der Nennspannung (die möglichen 15 % Netzüberspannung haben eine wesentliche Lebensdauerverkürzung zur Folge)
- Erschütterungen im Betrieb
- Umgebungstemperatur
- häufiges Aus- und Einschalten: der dünn gewordene Bereich des Glühfadens wird aufgrund des Kaltleiterverhaltens meist beim Anschalten durchbrennen, da durch den geringeren Widerstand des kalten Glühfadens im ersten Moment eine hohe Leistung abfällt.

Für Anwendungen, bei denen das Auswechseln aufwendig oder eine hohe Zuverlässigkeit erforderlich ist, gibt es Glühlampen, die eine lange Lebensdauer durch eine ähnlich geringe Lichtausbeute wie frühe Glühlampen erreichen: Sogenannte *Sig-Lampen* haben eine Lebensdauer von bis zu 6000 Stunden.

Die Lebensdauer von Projektor-Glühlampen beträgt hingegen aufgrund der hohen Glühfadentemperaturen (hohe Effizienz und Leuchtdichte) oft nur 50 bis zu wenigen 100 Stunden. Für Fotoaufnahmen und Belichtung von Fotomaterial gibt es Spezialglühlampen (z.B. OSRAM Nitrachot S), die eine für Glühlampen sehr hohe Farbtemperatur von 3400K erreichen. Diese Lampen erreichen dabei auch 7500lm bei 250W, also die fünffache Lichtausbeute einer Allgebrauchsglühlampe. Erkauft wird dies durch eine sehr geringe Lebensdauer von nur wenigen Stunden, außerdem darf die Lampe nur wenige Minuten am Stück betrieben werden, da sonst der Glühfaden schmilzt.

Kraftfahrzeug-Glühlampen sind statt für ihre Nennspannung von 12 oder 24 V für die 14 oder 28 V des Bordnetzes ausgelegt. Die Betriebsspannung von Niedervolt-Halogen-Anlagen für Halogenglühlampen einer Nennspannung von 12 V beträgt demgegenüber oft nur 11,5 V. Zum Kompromiss zwischen Lebensdauer und Lichtausbeute bei Allgebrauchslampen siehe auch Phöbuskartell.

Sonderformen

Halogenglühlampen (Wolfram-Halogen-Kreisprozess)

Die Zugabe des Halogens Iod, auch Brom, steigert die Lebensdauer auf 2000 bis 4000 Stunden – bei einer Betriebstemperatur von etwa 3000 K. Die so genannten *Halogenglühlampen* erreichen eine Lichtausbeute von etwa 19 bis 35 lm/W (vergleiche mit herkömmlicher Glühlampe etwa 12–15 lm/W, Energiesparlampe 40–60 lm/W).

Das Iod reagiert (zusammen mit Restsauerstoff) mit den vom Glühdraht verdampften Wolframatomen und stabilisiert eine wolframhaltige Atmosphäre. Der Prozess ist reversibel: Bei hohen Temperaturen zerfällt die Verbindung durch Pyrolyse wieder in ihre



Halogen-Glühlampe

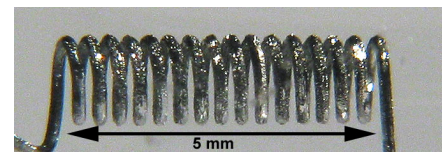
Elemente – Wolframatome schlagen sich auf der Glühwendel nieder. Kleine Temperaturdifferenzen entlang der Wendel spielen für die Zersetzung nur eine untergeordnete Rolle. Die Vorstellung, dass sich Wolfram ausschließlich an den dünnen überhitzten Bereichen der Wendel niederschlägt, ist falsch.^[5] Ein interessanter Nebeneffekt dieser Überlegung hätte darin bestanden, dass sich der Glühfaden an den dünnsten Stellen selbst reparieren würde. In Wirklichkeit findet die Kondensation von Wolframatomen jedoch an den kältesten Stellen der Wendel statt – es entstehen Whisker.^[6] Das Prinzip ist der chemische Transport, welcher sich in ähnlicher Weise auch beim Van-Arkel-de-Boer-Verfahren findet.

Der Halogenzusatz verhindert bei einer Glaskolbentemperatur von mehr als 250 °C den Niederschlag von Wolfram auf dem Glaskolben. Aufgrund der nicht vorhandenen Kolbenschwärzung kann der Glaskolben einer Halogenlampe sehr kompakt gefertigt werden. Das kleine Volumen ermöglicht einen höheren Betriebsdruck, der wiederum die Abdampftrate des Glühdrahtes vermindert. Daraus ergibt sich der lebensverlängernde Effekt bei Halogenlampen. Jedoch wird der Halogenprozess durch Dimmung der Halogenleuchte vermindert, da die dafür notwendige Temperatur nicht mehr erreicht wird.

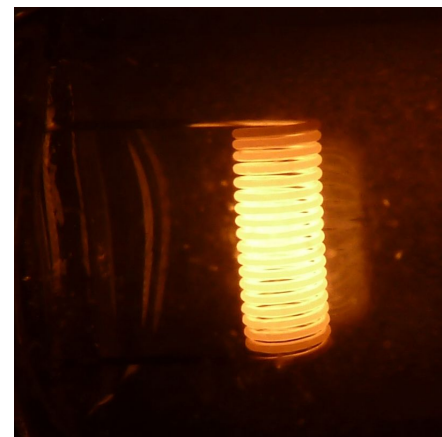
Das kleine Volumen ermöglicht zur Reduktion der Wärmeleitung die Befüllung mit schweren Edelgasen zu vertretbaren Kosten. Verunreinigungen auf dem Kolben (zum Beispiel Fingerabdrücke durch Anfassen des Glases) verkohlen im Betrieb und führen zu lokalen Temperaturerhöhungen, die zum Platzen des Glaskolbens führen können. Daher sollte eine Halogenlampe nach dem Berühren immer sorgfältig abgewischt werden. Zurückbleibende Salze können auch als Kristallisationskeime zur Entglasung beitragen und so Schäden verursachen.

Die erforderliche hohe Glaskolbentemperatur erzwingt eine kleine Bauform, um die Wärmeabgabe an die Umgebungsluft zu reduzieren, und den Einsatz von Kieselglas (Quarzglas), das der hohen Temperatur standhält. Gasdichte Stromdurchführungen werden bei den Quarzglasbolben von Halogenleuchtungen und auch bei Quarzglasbrennern von Gasentladungslampen mittels Molybdän-Folienbändern realisiert.

Halogenlampen für 230 V in der Standardbauform mit E27-Sockel sparen 30 % Energie gegenüber normalen Glühlampen (zum Beispiel 42 W statt 60 W) und können diese überall ersetzen, wo Energiesparlampen wegen der Aufwärmzeit nicht praktikabel sind. Diese Lampen erreichen damit zwar nicht die Effizienz von Kompaktleuchtstofflampen, sie können jedoch durch das Erreichen der Energieeffizienzklasse C die klassische Glühlampe nach Inkrafttreten der ersten Stufe der EU-Energiesparlampenrichtlinie im Jahr 2009



Glühwendel einer Kfz-H1-Lampe nach mehreren hundert Stunden Betriebsdauer. Die Wolframrekristallisationen sind deutlich zu sehen.



Glühwendel einer Halogenlampe im Betrieb.



mattierte Glühlampe mit leicht beeinträchtigter Staubschicht

ersetzen. Halogenlampen können wie klassische Glühlampen nach Gebrauch über den Restmüll entsorgt werden und erreichen eine ebenso gute Farbwiedergabe.

Eine neuere Entwicklung sind IRC-Halogenlampen (IRC = *Infrared Reflective Coating*, Infrarot reflektierende Beschichtung). Diese Lampen haben eine spezielle Beschichtung des Glaskolbens, die Licht passieren lässt, aber Wärmestrahlung auf die Glühwendel zurück reflektiert. Dadurch wird der Wärmeverlust vermindert und folglich die Lichtausbeute erhöht. Nach Herstellerangaben kann so der Energieverbrauch zusammen mit Verwendung von Xenon als Füllgasbestandteil gegenüber Standard-Halogenlampen um bis zu 30 % vermindert werden.

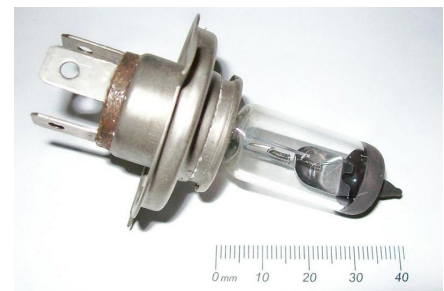


Halogen-Glühlampe 230 V mit Standardsockel E27

Weitere Varianten

Neben besonderen Kolbenformen, dem verwendeten Material (zum Beispiel mattiert oder aus Opalglas gefertigt) und der gewählten Einfärbungen gibt es folgende Sonderformen:

- Bilux-Lampen: Sie werden in Fahrzeugscheinwerfern verwendet und besitzen einen freien (Fernlicht) und einen mit einer Blende (Abblendlicht) versehenen Glühfaden mit ähnlicher Leistungsaufnahme.
- Glühlampen mit zwei Glühwendeln unterschiedlicher Leistung (Zweifadenlampen, zum Beispiel als Kombination Rücklicht/Bremslicht)
- Glühlampen mit Innenreflektor
 - Projektionslampen mit Wendel im Brennpunkt einer Innenverspiegelung
 - sogenannte *Kuppelspiegellampen* oder *Kopfspiegellampen* (KSL) mit Glühwendel im Mittelpunkt einer spiegelnden Halbkugelschale
- Wolframbandlampen: Sie besitzen ein Band statt einer Glühwendel; Einsatz als Strahlungsnormal oder in älteren Pyrometern (visueller Vergleich der Leuchtdichte und der Farbtemperatur mit der des Messobjektes)
- Hochtemperatur-Heizstrahler: Glühwendel mit relativ niedriger Betriebstemperatur, angeordnet in einem oft teilweise verspiegelten Glaskolben, der in Abstrahlrichtung vorrangig den Infrarot-Anteil passieren lässt (Rotlicht)
- Glühlampen zu Heizzwecken: Zum Beispiel stabförmige Halogen-Glühlampen in der Fixierwalze von Xerox-Kopierern und Laserdruckern
- stabförmige Halogen-Glühlampen mit beidseitigen Anschlusskontakten („Halogenstab“) mit Leistungen von 300 Watt bis mehrere Kilowatt: Eine gestreckte Einfach- oder Doppelwendel befindet sich mit Abstandshaltern in einem Quarzglas-Rohr. Einsatz in Lichtstrahlern auf Baustellen oder in Deckenflutern.



H4 Bilux-Halogenglühlampe mit Glühwendeln für Fernlicht (Mitte) und Abblendlicht (rechts in der Blechblende)

- Kaltlichtspiegellampen: sie besitzen einen externen dichroitischen Reflektor, der nur sichtbares Licht reflektiert, Infrarot jedoch passieren lässt (Anwendung: Niedervolt- und Hochvolt-Halogenglühlampen, Projektionslampen).
- Linienlampen sind im Prinzip große Soffittenlampen für Netzspannung aus langgezogenen Glasröhren mit einem Glühfaden über die ganze Länge. Linienlampen haben entweder eine Steckfassung in der Mitte der Röhre oder zwei Steckfassungen an den beiden Enden. Oftmals werden sie mit Leuchtstoffröhren verwechselt, der Grund ist die annähernd gleiche Form.

Bei blinkenden Glühlampen ist manchmal in Serie mit dem Glühfaden ein Bimetallschalter angeordnet. Diese Ausführung ist zum Beispiel in älteren Warnlampen oder Leuchtstäben zum Martinstag anzutreffen. Im kalten Zustand ist dieser Schalter geschlossen. Durch die Wärmeeinwirkung des Glühfadens und der Wärmekapazität des Bimetalls verbiegt sich das Schaltelement und öffnet eine Kontaktstelle. Der Stromfluss wird unterbrochen und die Glühlampe erlischt. Nach ausreichender Abkühlung schließt der Kontakt wieder, der Glühfaden leuchtet wieder und erwärmt dadurch erneut das Schaltelement, der Vorgang beginnt von vorne, die Lampe blinkt.

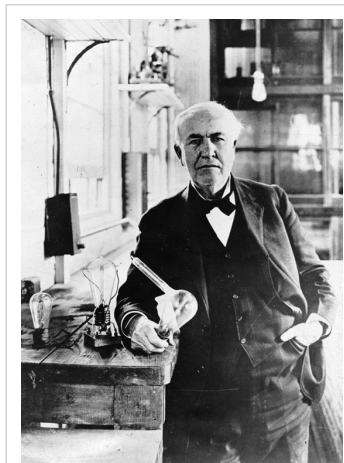


Blinkende Glühlampe mit Bimetallschalter (die Animation in Zeitlupe zeigt den Augenblick, in dem der Schalter öffnet)

Geschichte

Es existieren Belege für eine frühe Glühlampe mit Platinfaden unter einer evakuierten (luftleeren) Glasglocke aus der Zeit um 1820. Herkunft und Datierung der als „De-la-Rue-Lampe“ oder auch „De-la-Rive-Lampe“ bezeichneten Lampe sind unklar.^[7] Später benutzte man wegen des höheren Schmelzpunktes und besserer Lichtausbeute zunächst Kohlestifte und dann Kohlefäden, wobei von Edison 1881 patentierte verkohlte Bambusfäden besonders gut geeignet waren.^[8]

Am 25. Juli 1835 führte der Schotte James Bowman Lindsay bei einem öffentlichen Meeting in Dundee ein konstantes elektrisches Licht vor. Er gab an, dass er „ein Buch in einem Abstand von eineinhalb Fuß lesen“ könne. Lindsay vervollkommnete die Vorrichtung zu seiner eigenen Zufriedenheit, wandte sich danach jedoch von seiner Erfindung ab und dem Problem drahtloser Telegraphie zu. Frederick de Moleyns erhielt 1841 das erste bekannte Patent auf eine Glühlampe. Er verwendete Kohlepulver zwischen Platindrähten unter einem luftleeren Glaskolben. Der Amerikaner John Wellington Starr erhielt 1845 durch Edward Augustin King in London ebenfalls ein Patent auf eine Glühlampe. In diesem Patent werden Kohlestifte als geeignetes Glühmaterial für helles Licht genannt. Ebenfalls 1845 veröffentlichte



Thomas Alva Edison, mit einer Glühlampe in der Hand

der Engländer William Robert Grove die Konstruktion einer von ihm 1840 entwickelten Glühlampe mit Platinglühfaden in Spiralform.^[9]

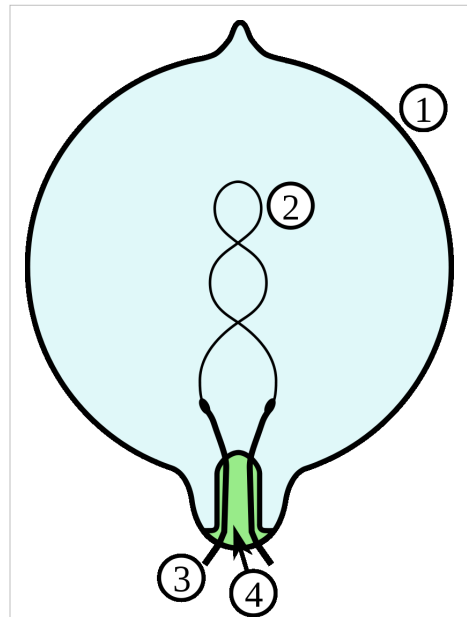
Zahlreiche Patente für Glühlampen wurden ab den 1850er Jahren angemeldet. Die Entwickler scheiterten mit der Herstellung länger haltender Glühlampen zunächst an der Vakuumtechnik. Nach Erfindung und Verbreitung der Vakuumpumpe intensivierten sich in den 1870er Jahren die Konstruktionsanstrengungen in verschiedenen Ländern mit der Folge zahlreicher Patentanmeldungen. Die Brenndauer der Konstruktionen lag jedoch bei unter 10 Stunden. Neben der Haltbarkeit der Lampen wurde das Problem des Energieverbrauchs ein Schwerpunkt der Bemühungen. 1874 erhielt Alexander Nikolajewitsch Lodygin in Russland ein Patent auf eine Glühlampe mit einem Kohlefaden oder einem dünnen Kohlestift in einem mit Stickstoff gefüllten Glaskolben.

Der britische Physiker und Chemiker Joseph Wilson Swan entwickelte 1860 ebenfalls eine Glühlampe, bei der er als Glühfaden verkohltes Papier in einem luftleeren Glaskolben benutzte. Erst 1878 gelang ihm die Herstellung einer praktisch brauchbaren elektrischen Glühlampe. Er erwarb sein Patent in England 1878 mithin zwei Jahre früher als Edison sein vergleichbares Patent in den USA. Er stattete seine Glühlampen mit einer speziellen Fassung, der Swanfassung aus, die sich im Gegensatz zu den Schraubgewinden der Edisonglühlampen bei Erschütterung, zum Beispiel in Fahrzeugen, nicht lösten. Nach anfänglichen Patentrechtsstreitigkeiten einigten sich Edison und Swan und gründeten schließlich 1883 in London eine gemeinsam betriebene Firma.

Thomas Alva Edison verbesserte die Glühlampe und erhielt am 27. Januar 1880 das Basispatent Nummer 223898^[10] für seine Entwicklungen in den USA. Seine Glühlampe bestand aus einem evakuierten Glaskolben mit einem Kohleglühfaden aus verkohlten

Bambusfasern. Zahlreiche Verbesserungen insbesondere bei der Präzisionsherstellung des Glühfadens führten zu Glühlampen, mit denen Edison den Wettbewerb gegen die damals üblichen Gaslampen erfolgreich aufnahm. Haltbarkeit, Lichtausbeute und Energiekosten spielten dabei eine Rolle. Da Edison am 21. Oktober 1879 die vom damaligen US-Patentrecht vorgeschriebene öffentliche Vorführung der betriebsbereiten Erfindung in Menlo Park, New Jersey durchführte, gilt 1879 als Erfindungsjahr der praktisch nutzbaren Glühlampe. Edisons Glühlampen waren im Unterschied zu Swans Lampen mit hochohmigen Glühfäden ausgestattet, die zwar schwierig herzustellen waren, den Einsatz in elektrischen Netzen jedoch wesentlich vereinfachten und verbilligten. Bei hoher Spannung für hochohmige Verbraucher konnte elektrische Energie einfacher transportiert werden und die möglichen geringeren Kabelquerschnitte sparten erhebliche Kupfermengen. Dadurch wurde ein Energieversorgungsnetz für Elektrizität technisch machbar und mit Netzen für Gaslampen wettbewerbsfähig. Deswegen wird die Erfindung der praktisch nutzbaren Glühlampe gemeinhin Thomas Alva Edison zugeschrieben. Edisons Konstruktion war die erste Glühlampe, die nicht nur in geringer Stückzahl in Werkstätten hergestellt wurde, sondern in einer eigens errichteten Fabrik in Serienfertigung ging.

Die Benutzung von Kohlefadenglühlampen in privaten Haushalten in den 1880er-Jahren ging einher mit dem Aufbau von Versorgungsnetzen für elektrische Energie. Diese Produkte markieren mithin den Beginn der



Glühlampe von C. H. F. Müller, wie auf der Weltausstellung Paris 1878 vorgestellt



Kohlefadenglühlampe, E27-Sockel, 220 Volt, etwa 30 Watt, links an 100 Volt

durchdringenden Elektrifizierung in der kulturellen Entwicklung.

Um die Verteilung des neu entstehenden Elektromarktes wurde in den 1880er-Jahren hart gekämpft, wobei insbesondere zahlreiche Patentprozesse um das Schlüsselprodukt der Elektrifizierung, die Glühlampe mit hochohmigem Kohlefaden, geführt wurden. Heinrich Göbel gab 1893 in Patentprozessen zwischen der *Edison Electric Light Co.* und anderen amerikanischen Glühlampenherstellern an, bereits ab den frühen 1850er-Jahren mit Kohlefadenglühlampen experimentiert zu haben, konnte seine Behauptung der Antizipation der Edison-Erfindung aber vor Gericht nicht beweisen.^[11] Er galt dennoch im 20. Jahrhundert in Deutschland als Erfinder der Kohlefadenglühlampe. Die erste deutsche Glühlampe soll 1883 in Stützerbach (Thüringen) hergestellt worden sein. Diesbezügliche Quellen stehen allerdings im Widerspruch zur älteren oben abgebildeten Glühlampe vom C. H. F. Müller.

Die Eignung von Osmium, Tantal oder Wolfram für Glühfäden war wegen des hohen Schmelzpunktes dieser Metalle bekannt. Aber erst technische Entwicklungen in der Pulvermetallurgie wie die Sintertechnik ermöglichten deren wirtschaftliche Verarbeitbarkeit. Osmium und Tantal sind seltene und mithin teure Rohstoffe. Bei dem sehr harten und spröden Wolfram waren die zu lösenden Verarbeitungsprobleme am größten. Der österreichische Chemiker und Gründer von OSRAM Carl Auer von Welsbach leistete einen wichtigen Beitrag zu der Erfindung der Glühlampe, indem er ein Verfahren zur Herstellung von Drähten aus Osmium (Patent 1890) und Wolfram entwickelte, die damals als Metalle mit den höchsten Schmelzpunkten galten.

1897 erfand der Physikochemiker Walther Nernst in Göttingen die nach ihm benannte Nernstlampe, die von der AEG und von Westinghouse (Nernst Lamp Company) produziert wurde. Bei dieser Glühlampe dient ein dünnes Stäbchen (*Nernststift*) aus einem Festkörper-Elektrolyt (überwiegend Zirkoniumoxid mit Zusätzen) statt eines Kohle- oder Metallfadens als Glühkörper. Der Nernststift benötigt kein Schutzgas, sondern kann in normaler Umgebungsluft betrieben werden.

Im Jahre 1903 erfand Willis Whitnew einen Glühfaden, der die Innenseite einer Glühlampe nicht schwärzte. Es war ein metallummantelter Kohlefaden. Bereits ein Jahr zuvor (1902) erkannte der deutsche Chemiker Werner von Bolton mit dem Schweizer Physiker Otto Feuerlein das chemische Element Tantal (Ta) als geeignetes Material zur Herstellung von metallischen Glühfäden. 1905 wurden die ersten Glühlampen mit Tantalfäden ausgeliefert und ersetzten allmählich die bisherigen Kohlefadenlampen. Die Tantallampe war zwar eine kurze Episode in der Geschichte der Glühlampe im Vorfeld der Entwicklungen zur heute verwendeten Wolframlampe, aber bis zum Ausbruch des Ersten Weltkriegs konnten weltweit über 50 Millionen Tantallampen nach Bolton und Feuerleins Verfahren hergestellt und verkauft werden.

Im Jahre 1906 wurden von der General Electric Company Patente für Wolframglühfäden als Basis für eigene Forschungs- und Weiterentwicklungsarbeiten gekauft. Diverse Quellen nennen Alexander Nikolajewitsch Lodygin als Patentinhaber, der schon in den 1890er Jahren mit Wolfram experimentiert hatte und auf der Weltausstellung 1900 eine solche Lampe vorführte. In jener Zeit experimentierten viele Entwickler, u.a. auch der Kroatie Franjo Hannaman aus Zagreb, an der Entwicklung einer praktisch einsetzbaren Wolframglühfadenlampe. Glühfäden aus mittels Sintern gewonnenen Metall waren extrem spröde, die Verarbeitung zu Spiralen oder Schlaufen war für eine Massenproduktion unmöglich. Im Jahre 1910 erfand der für *General Electric* arbeitende William David Coolidge eine Methode zur Herstellung mechanisch stabiler Wolframglühfäden. *General Electric* begann 1911 mit der kommerziellen Herstellung der heute noch üblichen Glühlampen mit Wolframglühfäden. Dieser Lampentyp verbesserte das Verhältnis von Lichtausbeute zu Energieverbrauch erheblich. *General Electric* gewann die nach Auslauf der Edison-Patente verlorene Dominanz auf dem Glühlampensektor zurück.^[12]

Im Jahre 1911 entdeckte Irving Langmuir, dass durch die Verwendung eines Argon-Stickstoff-Gemischs in einer Glühlampe die Lebensdauer des Wolfram-Glühfadens verlängert wird. Seit 1936 wird Krypton als Füllgas benutzt, seit 1958 erstmals auch Xenon für Hochleistungslampen. 1931 beantragte die Chemikerin Mary B. Andrews in den USA ein Patent für eine elektrische Glühlampe, welches mit der Nummer 2019331 im Jahr 1935 erteilt wurde. Eine frühere Patenterteilung an eine Frau in der Glühlampentechnologie ist zur Zeit nicht bekannt.

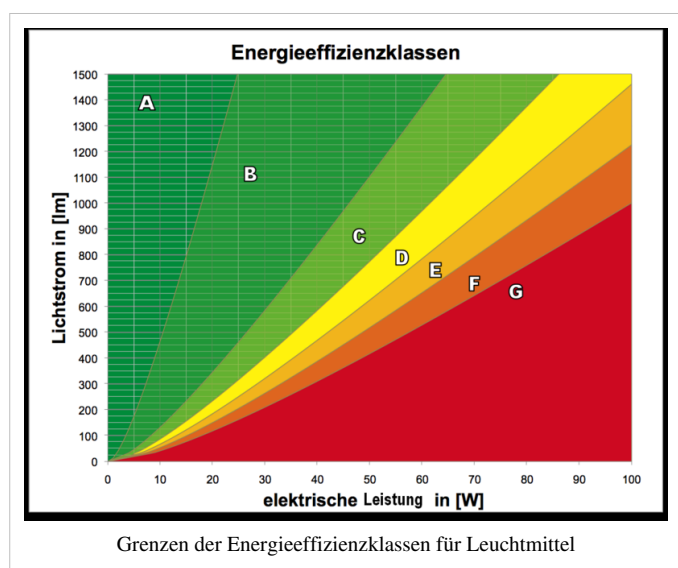
Der Berliner Erfinder Dieter Binniger entwickelte für seine Mengenlehre eine langlebige (150.000 h) „Ewigkeitsglühbirne“, die, wie auch die sogenannten SIG-Lampen (6000 h) besonders für Anwendungen gedacht war, bei denen ständig hohe Auswechselkosten entstehen, wie etwa bei Verkehrsampeln oder seiner Mengenlehre. Seine zwischen 1980 und 1982 eingereichten Patente zur „Verlängerung der Lebensdauer von Allgebrauchsglühlampen“ beruhen jedoch im Wesentlichen auf einer veränderten Wendelgeometrie und dem Betrieb mit Unterspannung mittels einer vorgeschalteten Diode.

Das Centennial Light (englisch *hundertjähriges Licht*) leuchtet seit 1901 fast ununterbrochen in der Feuerwache von Livermore im US-Bundesstaat Kalifornien. Die 4-Watt-Kohlefadenlampe gilt damit als dienstälteste Glühbirne der Welt.^[13]

Umweltaspekte

Energieeffizienzklassen von Glühlampen

Haushaltslampen werden in der Europäischen Union in Energieeffizienzklassen eingestuft, wobei die Skala von A (sehr effizient) bis G (weniger effizient) reicht. Herkömmliche Glühlampen erreichen die Effizienzklassen D, E, F und G. Niedervolt-Halogenlampen, die mit typisch 12 Volt betrieben werden, liegen oft in den Effizienzklassen B und C, müssen aber offiziell nicht in Effizienzklassen eingeteilt werden. Hochvolt-Halogenlampen, die direkt mit 230 V betrieben werden, erreichen heute ebenfalls die Effizienzklasse C^[14] und eignen sich daher neben Energiesparlampen nach 2012 als Ersatz für herkömmlichen Glühlampen. Messungen der Stiftung Warentest ergaben jedoch, dass Halogenlampen die deklarierten Energieeffizienzklassen oft nicht erreichen.^[15]



Verkaufsverbot von Glühlampen geringer Energieeffizienz

Seit etwa 2005 wird der Verkauf von Glühlampen geringer Energieeffizienzklasse in einigen Ländern verboten oder solche Verbote geplant, um Energie zu sparen. Glühlampen müssen durch Energiesparlampen besserer Energieeffizienzklassen ersetzt werden.

Australien

Australien kündigte als erster Staat im Februar 2007 an, ab 2010 herkömmliche Glühlampen zu verbieten. Die Regierung geht davon aus, dass durch diese Maßnahme jährlich vier Millionen Tonnen Treibhausgase weniger in die Luft ausgestoßen werden.^[16]

Europäische Union

Die EU-Kommission gab im Dezember 2008 bekannt, dass auf der Basis der Ökodesign-Richtlinie 2005/32/EG stufenweise Herstellungs- und Vertriebsverbote von Lampen geringer Energieeffizienz in den Mitgliedsländern umgesetzt werden.^[17] Der Verkauf bereits in Verkehr gebrachter Glühlampen bleibt aber weiterhin erlaubt. Mitte April 2009 ist die entsprechende EG-Verordnung 244/2009^[18] in Kraft getreten. Zuvor wurden die Anforderungen wegen umfangreicher Kritik erneut beraten; der Unterausschuss des EU-Parlaments beschloss am 17. Februar

2009 mit 44:14 Stimmen, daran festzuhalten.^[19] *Verkaufsverbot*, *Herstellungsverbot* und *Glühlampenverbot* sind umgangssprachliche Bezeichnungen für das Verbot. Irland plante als erster Staat der EU, bereits den Verkauf von Glühlampen geringer Energieeffizienz ab Januar 2009 zu verbieten.^[20]

Bereits auf dem Markt befindliche betroffene Produkte dürfen auch nach den genannten Terminen noch verkauft und gehandelt werden, es dürfen jedoch keine verbotenen Produkte mehr innerhalb der EU in Verkehr gebracht werden und an Handel oder Endverbraucher geliefert werden. Die Herstellung von Glühlampen ohne Erfüllung der Norm für den Export in Länder außerhalb der EU ist weiter erlaubt. Der Zoll soll seit September 2009 Paketsendungen auf verbotene Leuchtmittel kontrollieren.^[21]

Lampen mit mattiertem Glas müssen bereits seit der ersten Stufe der Anforderungen (seit September 2009) die Energieeffizienzklasse A haben; das bedeutete ein Verkaufsverbot für mattierte Glühlampen. Da mattierte Lampen keine Punktlichtquelle wie die klaren Lampen darstellen, lassen sie sich in ihrer Funktion nach Auffassung der EU-Kommission durch verfügbare Energiesparlampen direkt ersetzen.

Für *Lampen mit klarem Glas*, also Punktlichtquellen, gelten in Abhängigkeit von ihrer Leistungsaufnahme folgende Mindestanforderungen:

- seit September 2009: ab 100 Watt Energieeffizienzklasse C; bis einschließlich 100 Watt Energieeffizienzklasse E
- seit September 2010: ab 75 Watt Energieeffizienzklasse C; bis einschließlich 75 Watt Energieeffizienzklasse E
- ab September 2011: ab 60 Watt Energieeffizienzklasse C; bis einschließlich 60 Watt Energieeffizienzklasse E
- ab September 2012: Energieeffizienzklasse C für alle
- 2014 wird die gesamte Regelung auf dem Prüfstand stehen, um die Erfahrungen auszuwerten und neue technische Entwicklungstrends zu berücksichtigen.
- ab September 2016: Energieeffizienzklasse B für alle; Ausnahmen für einige Halogenlampen mit Effizienzklasse C, für die es derzeit noch keinen geeigneten Ersatz gibt.

Derzeit sind herkömmliche Glühlampen in den Effizienzklassen D, E und F verfügbar; Halogenlampen (230 Volt) erreichen teilweise die Effizienzklasse C. Niedervolt-Halogenlampen werden nicht in Energieeffizienzklassen eingeteilt. Neben den Anforderungen an die Energieeffizienz gelten bereits ab der ersten Stufe auch strengere Qualitätsanforderungen an die weiteren Betriebseigenschaften, wie die Lebensdauer, den Lichtstromrückgang, die Schaltfestigkeit, die Anlaufzeit (bis 60% des Lichtstroms erreicht sind) sowie Anforderungen an die Produktinformationen auf Verpackungen und Katalogen.

Speziallampen, beispielsweise zur Verwendung in Kraftfahrzeugen, in der Fahrradbeleuchtung, in Kühlschränken, Backöfen oder der Medizin^[22], sind von den Verboten nicht betroffen; ebenso Lampen besonders kleiner und großer Leistung (Lichtstrom unter 60 Lumen oder über 12000 Lumen). Ebenfalls nicht betroffen sind Reflektorlampen, die einen gebündelten Lichtstrahl abgeben, da es zu diesen Lampen bisher keine ausreichend verbreiteten Alternativen gibt. Für Leuchtstofflampen und Hochdruckentladungslampen gilt die EG-Verordnung 245/2009.^[23]

Neuseeland

In Neuseeland sollten Glühlampen geringer Energieeffizienz ab Oktober 2009 verboten werden.^[24] Diese Pläne wurden inzwischen wieder aufgegeben und sollen durch effizientere Einsparmöglichkeiten ersetzt werden.^[25]

Kuba

Am 17. November 2005 forderte Fidel Castro die Kubaner auf, Glühlampen durch Energiesparlampen zu ersetzen. Hintergrund ist die Energieknappheit in Kuba.

Schweiz

In der Schweiz ist seit 2009 der Verkauf von Glühlampen, die nicht mindestens der Energieeffizienzklasse E entsprechen, verboten.^[26]

Vereinigte Staaten von Amerika

In den USA wurde in dem im Jahre 2007 verabschiedeten Energy Independence and Security Act eine schrittweise Verschärfung der Vorschriften zur Energieeffizienz von Glühlampen zwischen 2012 und 2014 beschlossen. Abgesehen von den beschlossenen Ausnahmen, beispielsweise für farbige Glühlampen, werden durch diesen Act herkömmliche Glühlampen verboten.^[27] Die letzte große Fabrik für herkömmliche Glühlampen in den USA wurde im September 2010 geschlossen.^[28]

Kritik an Verboten

Glühlampenverbote eignen sich nach Meinung mancher Kritiker nicht zur CO₂-Einsparung, da nur der Emissionshandel letztlich den Kohlendioxidausstoß mit Kosten belege. Die durch das Glühlampenverbot eingesparten Energiemengen können daher anderweitig verkauft werden, ohne dass zusätzliche Emissionszertifikate erworben werden müssten. Alternativ können auch die nicht benötigten Zertifikate von den Energieerzeugern an andere Industrien verkauft werden. Die Wirkung eines Glühlampenverbotes auf den CO₂-Ausstoß sei daher allenfalls mittelbar wirksam. Ein sinnvollerer Steuerinstrument zur Erreichung der umstrittenen Klimaziele sei daher die direkte Begrenzung der Emissionsmenge von Kohlendioxid.^[29]

Ein Vorteil der Glühlampe sei, dass sie stufenlos gedimmt werden kann. Die meisten Energiesparlampen sind nicht dimmbar; einige Energiesparlampen sind stufenweise dimmbar; stufenlos dimmbare Energiesparlampen sind deutlich teurer. Ein weiterer Vorteil sei die sofortige Bereitstellung der vollen Lichtleistung, während die meisten Energiesparlampen erst langsam hochfahren würden. Dieses erfordere den Einsatz spezieller Energiesparlampen (Osram-Facility- oder Hybridlampen) zum Beispiel für die Treppenhausbeleuchtung.

Glühlampen funktionieren mit jeder gängigen Frequenz einschließlich Gleichstrom aus akkugespeisten Notstromversorgungsanlagen. Einige Energiesparlampentypen funktionieren aufgrund ihres elektronischen Vorschaltgerätes nur mit der Frequenz, für die sie gebaut wurden, zum Beispiel 50 Hz, nicht jedoch mit Gleichstrom. Für batteriegespeiste Sicherheitsbeleuchtungsanlagen gibt es spezielle Energiesparlampentypen, die vom Hersteller für den Betrieb an Wechsel- und Gleichspannung vorgesehen sind. In den meisten Fällen funktionieren gewöhnliche Energiesparlampen auch an Gleichspannung, da übliche elektronische Vorschaltgeräte die Netzwechselspannung ohnehin gleichrichten. Die Hochfrequenzabstrahlung der Vorschaltgeräte ist nicht größer als die anderer Haushaltgeräte^[30], ist aber trotzdem in die Kritik geraten. Gütesiegel für besonders strahlungsarme Lampen sind in Vorbereitung.

Nach einer Studie der EU-Kommission amortisieren sich Energiesparlampen je nach Annahme des Kaufpreises der Lampe und des Strompreises nach 1500 bis 2500 Stunden Nutzungszeit gegenüber der Glühlampe. Kritiker bemängeln den sich ergebenden langen Zeitraum von 30 Jahren bei wenig genutzten Lampen wie in Abstellräumen mit zirka einer Stunde Leuchtdauer je Woche.^[31] Bislang nicht untersucht ist die Auswirkung eines eventuell veränderten Benutzerverhaltens bei Einsatz von Energiesparlampen auf die Energieeinsparung. Unnötig lange Leuchtzeiten wegen der geringeren Kosten und Umweltauswirkungen sind denkbar (→Reboundeffekt).

Quecksilber-Emission

Die vielfach als Argument gegen die energieeffizienteren Kompaktleuchtstofflampen genannte Quecksilberbelastung spricht nach Berechnungen einiger Institute wie z. B. der Deutschen Umwelthilfe noch stärker gegen herkömmliche Glühlampen. Denn durch die Stromerzeugung aus Steinkohle werden in Deutschland nach Berechnungen des Öko-Instituts pro Kilowattstunde Strom durchschnittlich 14,7 Mikrogramm Quecksilber freigesetzt, allerdings überwiegend nicht in elementarer Form. Die vermiedenen Quecksilberemissionen durch Stromeinsparung seien damit größer als der gesamte Quecksilbergehalt der Energiesparlampen.^[32] Die Zeitschrift Öko-Test kommt auf Basis der gleichen Daten zum Ergebnis, dass die Quecksilberbilanz bei einem Drittel der Kompaktleuchtstofflampen schlechter sei als bei Glühlampen.^[33] Andere Energiesparlampen wie Halogen-Glühlampen oder LEDs enthalten keinerlei Quecksilber.

Zerbricht eine quecksilberhaltige Kompaktleuchtstofflampe, sollte das betreffende Zimmer gelüftet sowie die Scherben bis zur Entsorgung in einer verschlossenen Plastiktüte aufbewahrt werden. Eine Gesundheitsgefährdung besteht dann auf Grund der geringen Quecksilbermenge nicht.^[34]

Entsorgung

Sogenannte Allgebrauchs- und auch Halogenglühlampen enthalten keine umweltbelastenden Inhaltsstoffe und können als Hausmüll oder hausmüllähnlicher Gewerbeabfall entsorgt werden. Die geringen Halogenmengen in Halogenglühlampen können als unschädlich angesehen werden. Anders ist es bei Entladungslampen wie Leuchtstofflampen, Energiesparlampen und Hochdruck-Entladungslampen, in denen Quecksilber für die Lichterzeugung verwendet wird. Diese sind nach dem amtlichen Abfallkatalog Sondermüll. Die Entsorgung von Entladungslampen aus dem Privathaushalt übernehmen die kommunalen Sonderabfall-Sammelstellen. Wichtig ist, dass die Lampen unbeschädigt dort abgegeben werden; sie können dann entsprechenden Recyclingunternehmen zugeführt werden.

Im Abfallgesetz ist festgelegt, dass der Besitzer von Abfällen zu deren Entsorgung verpflichtet ist und dass die Wiederverwertung Vorrang vor sonstiger Entsorgung (Deponierung, Verbrennung) hat. Der Wolfram- und Buntmetallanteil von Glühlampen wird bisher kaum wiederverwendet, lediglich die Edisonsockel können von automatischen Trenn- und Sortieranlagen mit Magnetscheidern erfasst werden.

Alternativen zur Glühlampe

Elektrische Lichtquellen

Lichtquellen mit besseren Wirkungsgraden oder einer höheren Lichtausbeute sind zum Beispiel Gasentladungslampen (Halogen-Metall dampflampen, Leuchtstofflampen, Quecksilberdampflampen, Natriumdampflampen, Halogenmetall dampflampen). Diese haben zwar ebenfalls häufig Edisonsockel, benötigen jedoch Vorschaltgeräte zum Betrieb und sind daher nicht direkt im Austausch gegen Glühlampen verwendbar.

Leuchtstofflampen sind auch in kompakten Formen als sogenannte Kompaktleuchtstofflampen mit im Sockel integrierten Vorschaltgerät gebräuchlich. Diese können daher direkt im Austausch gegen Edison-Glühlampen verwendet werden. In Entwicklung sind derzeit Lichtquellen mit hoher Lichtausbeute auf Basis von Leuchtdioden, die andere Leuchtmittel in vielen Bereichen bereits ersetzen können, wo es auf Wartungsfreiheit, lange Lebensdauer, geringen Energieverbrauch oder Erschütterungsunempfindlichkeit und weniger auf den Preis ankommt. Beispiele sind Taschenlampen, Befeuerung von Hindernissen, Fahrradscheinwerfer und Lichtquellen mit einstellbarer oder veränderbarer Farbtemperatur und Lichtfarbe. Besonders interessant ist die Anwendung von Leuchtdioden in Kraftfahrzeugen, weil die Stromerzeugung dort aufgrund des niedrigen Wirkungsgrades des Verbrennungsmotors ineffizient ist.

An der Entwicklung von organischen Leuchtdioden wird ebenfalls geforscht.



Nichtelektrische Lichtquellen

Nichtelektrische Lichtquellen sind nur dann eine Alternative zu Glühlampen, wenn kein Stromanschluss zur Verfügung steht. Lichtquellen von geringer Lebensdauer und Helligkeit, jedoch ohne externe Energiequelle sind die sogenannten Knicklichter, die auf Chemolumineszenz beruhen. Tritiumgaslichtquellen haben eine Lebensdauer von einigen Jahren und benötigen wie die Knicklichter ebenfalls keine externe Energiequelle. Sie werden hauptsächlich als Notfallbeleuchtung für Notausgänge etc. eingesetzt und beruhen wie Leuchtstofflampen auf Fluoreszenz, angeregt jedoch durch die Betastrahlung des radioaktiven Tritiums. Ihre Helligkeit ist sehr gering. Beide Lichtquellen werden nur als Notlicht eingesetzt.

Gaslaternen haben hauptsächlich historische Bedeutung, ihre Energieeffizienz ist vergleichbar mit Langlebensdauer-glühlampen; sie können wie auch Camping-Gasleuchten oder die mit Petroleum betriebenen Starklichtlampen Gas (Erdgas, Stadtgas, Flüssiggas) oder Petroleumdampf statt Strom nutzen. Die gegenüber Petroleumlampen wesentlich höhere Effizienz erreichen diese Leuchten durch einen Glühstrumpf.

Die Glühlampe in Kunst und Literatur

- Pablo Picasso gestaltete in seinem monumentalen Bild *Guernica* eine Glühlampe an Stelle der Sonne. Sie deutet vermutlich auf die von Flugzeugen abgeworfene Bomben, worauf auch das im Spanischen offensichtliche Wortspiel „la bombilla/la bomba“ (bombilla = Glühbirne) hinweist.^[35]
- Ingo Maurer schuf eine überdimensionierte Glühlampe aus Glas mit einer gewöhnlichen Glühlampe im Inneren mit Namen *Bulb* für das Museum of Modern Art in New York.^[36]
- Joseph Beuys zeigt in seinem Multiple mit Namen *Capri-Batterie* eine gelbe Glühlampe und deren Stromversorgung durch eine Zitrone.^[37]
- Lewis Latimer, ein Sohn amerikanischer Sklaven und später der einzige Afroamerikaner im engeren Mitarbeiterstab von Thomas Alva Edison, verfasste Lyrik und schrieb über die Glühlampe:

“Like the light of the sun, it beautifies all things on which it shines, and is no less welcome in the palace than in the humblest home.”

„Wie das Licht der Sonne, macht sie alle Dinge auf die sie scheint schöner, und ist in Palästen nicht weniger willkommen als im bescheidensten Haus“

– Lewis Latimer

- Günter Grass lässt in seinem Roman *Die Blechtrommel* die Hauptfigur Oskar Matzerath über dessen Geburt den Satz sagen:

»Ich erblickte das Licht dieser Welt in Gestalt zweier Sechzig-Watt-Glühlampen.«

Siehe auch

- Dunkelbirne, wissenschaftlicher Witz, entsprechend der Tag-Nacht-Lampe von Korf
- Heatball, alternative Bezeichnung für Glühlampen im Rahmen eines satirischen Projektes
- Linienlampe, Glühlampe in Röhrenform (sieht wie eine Leuchtstoffröhre aus, hat jedoch zwei radial herausstehende Sockel)

Literatur

- Roland Heinz, Andreas Schulz (Vorwort): *Grundlage der Lichterzeugung: Von der Glühlampe bis zum Laser*. Highlight, Rüthen 2004, ISBN 3-937873-00-7.
- Andreas Holzinger: *Von der Wachskerze zur Glühlampe*. In: Deutsch Taschenbücher. Band 95, Harri Deutsch, Thun/Frankfurt am Main 1998, ISBN 3-8171-1566-0.

- Hans Christian Rohde: *Die Göbel-Legende: Der Kampf um die Erfindung der Glühlampe*. Zu Klampen, Springe 2007, ISBN 3-8667-4006-9 (Zugleich Dissertation an der Universität Hannover 2006).
- Hans-Jürgen Wulf, BAG Turgi Electronics (Hrsg.): *Die Geschichte der elektrischen Glühlampenbeleuchtung*. Marbach & Marbach, Eich, Luzern 1998 (ohne ISBN).

Weblinks

- Story-of-The-Lamp^[38] (englisch, mit vielen Bildern)
- Die am längsten leuchtende Glühlampe – brennt bereits seit 1901 (Centennialbulb – longest burning light bulb in history)^[39] (englisch)
- Chemie in Glühlampen – Warum Glühlampen früher groß und dunkel waren, heute aber hell und klein^[40]
- Vergleichstabelle für alle üblichen Leuchtmittel^[41]
- Helmut Höge auf taz.de: *Hier spricht der Aushilfschausmeister!*^[42] über geplanten Verschleiß bei Glühlampen
- Kritischer Bericht zum EU-Verbot auf spiegel.de^[43]
- Auswahltabellen^[44]
- Mitteilung auf Umweltbundesamt^[45]

Einzelnachweise

- [1] Energy Saver Halogenleuchte 105 Watt (Lichtleistungsäquivalent Glühlampe 150 Watt klassisch) (<http://www.lampenprofi.ch/leuchtmittel/halogen-gluehlampen/energy-saver-classic-a-klar.php>) abgerufen am 20. Oktober 2009
- [2] Osram: Technik und Anwendung: Halogen-Niedervoltlampen (http://www.osram.de/osram_de/Professionals/DisplayOptic-Beleuchtung/Entertainment/Halogenlampen/Halogen_NV/halogen_nv_einleitung.pdf)
- [3] Christopher Schrader: *Die Techniker der Gemütlichkeit*. In: *Süddeutsche Zeitung*, 24. Dezember 2008, S. 2
- [4] Gigahertz-Optik (Hrsg.): *Leuchtmittel – Applikationen & Lichtmessung* (<http://www.gigahertz-optik.de/files/leuchtmittel.pdf>). 2008, S. 4.
- [5] Basic Physics of the Incandescent Lamp (<http://physicsed.buffalostate.edu/pubs/TPT/TPTDec99Filament.pdf>) abgerufen am 20. Oktober 2009
- [6] Chemie in Glühlampen (<http://www.uni-bayreuth.de/departments/didaktikchemie/umat/gluehlampen/gluehlampen.htm#kap6>) abgerufen am 20. Oktober 2009
- [7] „E.Covington: Eine Lampe unbekannten Ursprungs.“ (<http://home.frognet.net/~ejcov/delarue.html>), abgerufen 27. Februar 2007
- [8] Edison-Patent 251540 „carbon for electric lamps“ (<http://www.pat2pdf.org/pat2pdf/foo.pl?number=251540>)
- [9] Groves Lamp of 1840 (<http://home.frognet.net/~ejcov/grove.html>) abgerufen am 31. Oktober 2010
- [10] United States Patent and Trademark Office (<http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=/netahtml/PTO/srchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=0223898.PN.&OS=PN/0223898&RS=PN/0223898>)
- [11] Hans-Christian Rohde: *Die Göbel-Legende – Der Kampf um die Erfindung der Glühlampe*. Zu Klampen, Springe 2007, ISBN 978-3-86674-006-8
- [12] The History of Electric Lighting. (engl.) (<http://edisontechcenter.org/Lighting.html>) abgerufen am 28. Oktober 2010
- [13] Livermore's Centennial Light Live Cam (<http://www.centennialbulb.org/cam.htm>)
- [14] OSRAM Katalog 2009 <http://catalogx.myosram.com> Halogen Energy Saver Classic, Lampenleistung < 42 Watt – Energieeffizienzklasse C
- [15] Stiftung Warentest, Februar 2009 (<http://www.test.de/themen/umwelt-energie/test/-Halogenlampen/1750452/1750452/1749762/>): Halogenlampen – Bestenfalls befriedigend (Testergebnisse kostenpflichtig)
- [16] *In Australien wird die Glühbirne verboten* (<http://www.oekotest.de/cgi/nm/nm.cgi?doc=akt-200207-gluehbirne>). Auf: *ÖKO-TEST Online*. Am: 20. Februar 2007. (Nachrichten-Meldung)
- [17] *Phasing out incandescent bulbs in the EU* (http://ec.europa.eu/energy/efficiency/ecodesign/doc/committee/2008_12_08_technical_briefing_household_lamps.pdf), Dokument(PDF) auf ec.europa.eu, abgerufen am 15. Dezember 2008
- [18] VERORDNUNG (EG) Nr. 244/2009 [...] umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32009R0244:DE:NOT>). In: *Amtsblatt der Europäischen Union*. 24. März 2009 (Veröffentlichungsdatum), S. L 76/3 – L 76/16, abgerufen am 20. Mai 2009 (deutsch).
- [19] *Die Glühlampe erlischt*. In: *Süddeutsche Zeitung*, 18. Februar 2009, S. 8
- [20] Department of the Environment, Heritage and Local Government: *Gormley Outlines Position on Plan to Introduce Minimum Energy Efficiency Standards for Light Bulbs* (<http://www.environ.ie/en/Environment/Atmosphere/ClimateChange/News/MainBody,16444.en.htm>), 10. Januar 2008
- [21] *Zoll soll Glühbirnen abfangen* (<http://www.wiwo.de/politik/zoll-soll-gluehbirnen-abfangen-397392>), Wirtschaftswoche vom 16. Mai 2009
- [22] Deutschlandfunk, Sendung Marktplatz, 9. September 2010, 10:00 Uhr - 11:30

- [23] VERORDNUNG (EG) Nr. 245/2009 [...] umweltgerechte Gestaltung von Leuchtstofflampen ohne eingebautes Vorschaltgerät, Hochdruckentladungslampen sowie Vorschaltgeräte und Leuchten zu ihrem Betrieb [...] (<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32009R0245:DE:NOT>). In: *Amtsblatt der Europäischen Union*. 18. März 2009 (Verkündungsdatum), abgerufen am 16. Juli 2009 (deutsch).
- [24] Welt.de: *Neuseeland verbietet herkömmliche Glühbirnen* (http://www.welt.de/wirtschaft/article2113781/Neuseeland_verbietet_herkoemmliche_Gluehbirnen.html), vom 17. Juni 2008, abgerufen am 8. Dezember 2008
- [25] Stuff.co.nz: *National ditch light bulb phase-out* (<http://www.stuff.co.nz/national/764487>) vom 17. Dezember 2008, abgerufen am 26. August 2009
- [26] Edisons Glühlampe vor dem Erlöschen (http://www.nzz.ch/nachrichten/schweiz/strommarkt_bundesrat_1.690947.html), NZZ vom 17. März 2008
- [27] U.S. Government Printing Office: *Public Law 110 - 140 - Energy Independence and Security Act of 2007* (<http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/PLAW-110publ140/content-detail.html>)
- [28] The Miami Herald: *Last major U.S. factory making incandescent light bulbs closes* (<http://www.miamiherald.com/2010/09/13/1822298/last-major-us-factory-making-incandescent.html>)
- [29] Bodo Sturm: *Das Glühlampenverbot bring nichts*. In: *Süddeutsche Zeitung*, 19./20. Juli 2008, S. 24.
- [30] EMF von Energiesparlampen (PDF, 483 KB) (<http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00921/00922/index.html?lang=fr&download=M3wBUQCu/8ulmKDu36WenojQ1NTTjaXZnqWfVp7Yhmfnapmmc7Zi6rZnqCkkIV0gXd7bKbXrZ2lhtTN34al3p6YrY7P1oah162apo3X1cjYh2+hoJVn6w==>) abgerufen am 20. Oktober 2009
- [31] Christopher Schrader: *Das neue Licht*. In: *Süddeutsche Zeitung*, 5. September 2009, S. 22
- [32] Aus für Stromfresser Glühbirne (<http://www.taz.de/1/zukunft/umwelt/artikel/1/aus-fuer-stromfresser-gluehbirne/?type=98>) *die tageszeitung* 8. Dezember 2008
- [33] Keine Leuchten (<http://www.oekotest.de/cgi/ot/otgp.cgi?doc=91415>): „[...] gibt zumindest ein Drittel der Energiesparlampen im Test deutlich mehr Quecksilber in die Umwelt ab als die Glühbirne. Nach dem Dauertest kann sich das Ergebnis noch weiter zu ungunsten der Energiesparlampen verschieben.“
- [34] Eine Kompaktleuchtstofflampe enthält 1 mg bis 5 mg Quecksilber, von denen nach dem Zerbrechen nur ein kleiner Bruchteil eingeatmet wird. Zum Vergleich: Für Fisch als Nahrungsmittel galt ab 1986 in Deutschland der Grenzwert 1,0 mg/kg, in der EU seit 2001 derselbe Wert für fettreiche Fische und Raubfische, für fettarme Fische die Hälfte (http://www.bfr.bund.de/cm/208/verordnung_eg_nr_466_2001_der_kommission.pdf).
- [35] Foto des Bildes *Guernica* von Pablo Picasso (<http://images2.wikia.nocookie.net/wikiality/images/d/d4/Guernica.jpg>) abgerufen am 25. Oktober 2009
- [36] Museum of Modern Art, Ingo Maurer *Bulb* (http://www.moma.org/collection/browse_results.php?criteria=O:AD:E:3854&page_number=1&template_id=1&sort_order=1) abgerufen am 25. Oktober 2009
- [37] Foto einer Variante von *Capri-Batterie* von Joseph Beuys (http://images.artnet.com/artwork_images_614_46868_joseph-beuys.jpg) abgerufen am 25. Oktober 2009
- [38] <http://bulbcollector.com/story1.html>
- [39] <http://www.centennialbulb.org/>
- [40] <http://www.uni-bayreuth.de/departments/didaktikchemie/umat/gluehlampen/gluehlampen.htm>
- [41] http://www.energie-bewusstsein.de/index.php?page=thema_strom_beleuchtung&p2=leuchtmittel_vergleichstabelle
- [42] <http://www.taz.de/blogs/hausmeisterblog/2006/08/06/83/>
- [43] <http://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/0,1518,644215,00.html>
- [44] <http://www.energieagentur.nrw.de/haushalt/energiesparlampen/default.asp?site=ea>
- [45] http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3754

Grundfarbe

Grundfarben sind im engeren Sinne die theoretisch in einem gewählten Farbraum als Bezugswert zugrunde gelegten Farbvalenzen. Im weiteren Sinne sind es die zum Mischen, um eine bestimmte Farbwahrnehmung zu erreichen, nutzbaren Farbmittel.

Begriffe

Spektralfarbe

Spektralfarben sind die leuchtstarken, reinen Farben, wie sie sich im Sonnenspektrum, am Rand von CDs oder beim Regenbogen zeigen. Newton ordnete wegen der *heiligen* Zahl Sieben, diesem Kontinuum sieben Grundfarben zu: Violett, Indigo, Blau, Grün, Gelb, Gelbrot, Rot. Durch Beugungs- oder Interferenzeffekte wird das „weiße“ Licht in die „bunten“ Farben des Spektrums zerlegt. Mischungen aus mehreren Spektralfarben bezeichnet man als Valenzfarben, so ist die Valenzfarbe Magenta eine Mischung der Spektralfarben Violett und Rot.

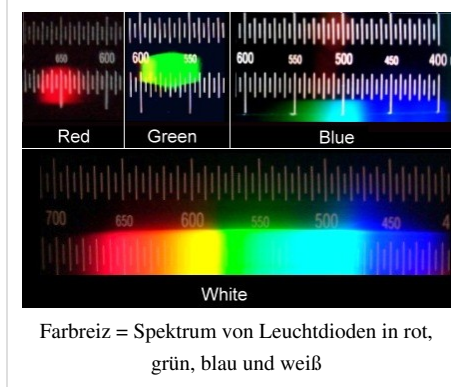
Farbvalenz

Das auslösende Ereignis des Farbeindrucks ist der Farbereiz, die daraus folgende rechnerische Größe (Zahlenwert oder Vektor) ist die *Farbvalenz*.

Bei der Erarbeitung des CIE-Normvalenzsystems wurden drei *Primärvalenzen* als Eichfarbwerte ermittelt, die aus den Empfindlichkeiten der drei Zapfen abgeleitet sind. Die Primärvalenzen entsprechen also dem LMS-Farbraum, dabei wird der L-Zapfen(valenz) mit \vec{R} bezeichnet, dem M-Zapfen wird die Primärvalenz \vec{G} zugeordnet und die aus dem Empfindlichkeitsspektrum der S-Zapfen abgeleitete Primärvalenz wird mit \vec{B} bezeichnet. Diese Primärvalenzen werden als Basisvektoren eines dreidimensionalen Farbraumes genutzt. Die Buchstaben **L**, **M** und **S** für die Zapfen stehen für long-, medium- und shortwave.

Bei den Anfängen der Farbmessung wurden diese Primärvalenzen mittelbar gemessen. Bei dieser Messtechnik wurde (durch Ändern des Vergleichslichtes) Licht abgezogen, sozusagen Farbe weggenommen. Um solche negativen Farbwerte zu vermeiden, wurden nach den Rechenvorschriften für Vektoren virtuelle *Grundvalenzen* abgeleitet, die den Farbraum aufspannen, dies sind

\vec{X} als Rot-, \vec{Y} als Grün- und \vec{Z} als Blauvalenz.



Grundfarbe

Obwohl das sichtbare Spektrum und auch die Vielfalt aller Farbnuancen praktisch ein Kontinuum bilden, ist für die Verständigung eine Beschränkung auf wenige Farbnamen notwendig. Je nach Sprache und Kultur gibt es in der Regel zwei bis sechs Namen für Farben, die auch als Grundfarben gelten.

Werden nur zwei Grundfarben unterschieden, dann sind dies gewöhnlich „schwarz“ und „weiß“, besser „hell“ und „dunkel“ oder eben (nacht-)blau und (licht-)gelb. Als Regel kann gelten, dass Sprachen, die mehr als zwei Farben (schwarz/weiß) unterscheiden, zunächst „rot“ als dritte Grundfarbe kennen.

Für Goethe steht „blau“ für „dunkel“(heit), „Gelb“ für hell und licht als Basisfarbe, Rot (und Grün) ist daraus eine Mischung.

In der Erfahrung der Kunstmaler und dann theoretisch bei dem Franzosen Blonde und in Youngs Drei-Farben-Theorie sind dies: Rot, Gelb, Blau. Dies sind dabei die grundlegenden Farben, aus denen alles andere ermischbar ist.

Entsprechend der Gegenfarbentheorie von Ewald Hering existieren vier Grundfarben, diese bilden die Paare Grün-Rot und Blau-Gelb (neben Hell-Dunkel).

Für den RGB-Farbraum sind es die drei Valenzen Rot, Grün, Blau, auf die die Leuchtstoffe des Monitors optimal abgestimmt werden. Hilfsweise wird in neueren Geräten wieder ein Gelb zugewählt, um den LMS-Farbraum des Auges besser zu simulieren.

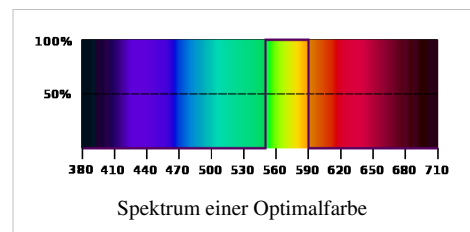
Primärfarben und Sekundärfarben

Primärfarben nennt man die *Ausgangsfarben* eines gedachten oder tatsächlichen Mischprozesses. Für die additive Mischung sind es die Lichtfarben ein Rot, ein Grün und ein Blau. Für die subtraktive Mischung sind Primärfarben die Körperfarben ein Cyan, ein Gelb und ein Magenta. Sekundärfarben sind Mischungen aus zwei benachbarten Primärfarben.

Rudolf Arnheim empfiehlt, zwischen „generativen“ und „fundamentalen“ Primärfarben zu unterscheiden^[1]. Generative Primärfarben sind Farben, die zum Mischen, also zum Generieren von Sekundärfarben verwendet werden. Fundamentale Primärfarben sind dagegen die Primärfarben der psychologischen Ebene. Es zeigt sich, dass Versuchspersonen jede Farbe gut beschreiben können, indem sie die Farben als Mischungen der vier Farben Rot, Gelb, Grün und Blau beschreiben (darauf basiert das NCS). Dagegen ist es psychologisch kaum möglich, sich ein Gelb als Mischung von Rot und Grün vorzustellen (als additive Mischung). Auch ist ein „bläuliches Gelb“ kaum als Gelbgrün vorstellbar (als subtraktive Mischung).

Optimalfarben

Von Wilhelm Ostwald und von Robert Luther vertieft entstand der Begriff der Optimalfarben für idealisierte Farben, die auf Ausschnitten vom Spektrum beruhen, wobei die Intensität nur die Werte 0 und 1 annehmen. Je nach Lage der Sprungwellenlängen gibt es blaue Kurzendfarben, grüne Mittelfarben, rote Langendfarben und violette Mittelfehlfarben.



Hell-Dunkel, Unbuntfarben

Etwas abseits der bunten Farben finden sich Schwarz und Weiß, die »extremen« Fälle von Neutralgrau. Diese Unbuntfarben nehmen eine gesonderte Rolle ein, da sie (eben gerade) nicht bunt sind. Es sei in der historischen Entwicklung auf die Interpretation von Goethe verwiesen, der in seinem Willen zur ganzheitlichen Betrachtung der Welt, die Dualität des Hell und Dunkel auf die Farben Blau und Gelb projiziert.

Bei Wilhelm Ostwald finden sich die Begriffe als verhüllte (das ist verschwärzlicht) und verweißlichte Farben, die er den Optimalfarben entgegensetzte. Den Durchbruch hierfür schaffte Siegfried Rösch, indem er aus den Optimalfarben den Begriff der **Relativ-Helligkeit** ableitete.

Vollfarbe

In Ostwalds Farbkreis ist Vollfarbe die Bezeichnung für die Buntheit. Es sind die gesättigsten und reinsten (weil eng begrenzten) Optimalfarben. In diesem Farbsystem werden die Farben durch Schwarz trüber also weniger gesättigt, verschwärzlicht. Der Zusatz von Weiß, das Verweißlichen, bedingt eine Zunahme der Helligkeit der Farbe. Wenn der Weißanteil den Anteil Vollfarbe verdrängt hat erhält man die Unbuntfarbe Weiß. Die gesamte Anteilsomme »Farbe = Vollfarbeanteil v + Weißanteil w + Schwarzanteil s « liegt dabei immer bei 100 %, mehr als Farbe geht nicht.

Urfarben

Nach Ewald Hering gibt es die vier Urfarben Rot, Gelb, Blau und Grün, wobei die Farbenpaare Rot/Grün, Blau/Gelb und Schwarz/Weiß einander als Gegenfarben ausschließen. In seiner Farbtheorie bildet Küppers aus den drei „Empfindungskräften“ des Sehorgans die **Urfarben**, die zu den Farbempfindungen Orangerot (R), Grün (G) und Violettblau (B) führen.

Grundfarben in Sprachen

Der als kontinuierlich empfundene Farbkreis kann unterschiedlich eingeteilt werden. Was als Grundfarbe bezeichnet wird, hängt von kulturellen Traditionen und Konventionen ab.

Im europäischen System (indoeuropäischer Sprachraum) benennt man *vier* (bzw. sechs) Farben: Neben „schwarz“ und „weiß“ sind die vier „bunten“ Farben „rot“, „blau“, „gelb“ und „grün“ bekannt. Dieses Namenssystem ist allerdings relativ jung. In der Antike galten noch ganz andere Grundfarben. Noch im Althochdeutschen konnte man das lateinische Wort *flavus* („gelb“) gleichermaßen mit „gelb“ und „blao“ übersetzen. Beide Farbworte sind wohl germanischen Ursprungs.

Germanische Farbnamen drangen nach der Völkerwanderungszeit auch in die romanischen Sprachen ein: Die germanischen Farbworte „gel“ (gelb^[2], englisch „yellow“) findet sich als „giallo“ im Italienischen und ähnlich zum Teil auch in anderen romanischen Sprachen wieder. Ebenso wurde das althochdeutsche „blao“ (blau) von mehreren romanischen Sprachen übernommen: fr: „bleu“, it: „blu“ und katalanisch: „blau“.

Auch das Wort „blanc“ (frz. und katal. für „weiß“, ebenso ital. „bianco“, span. „blanco“ und port. „branco“) hat einen im deutschen Wort „blank“ noch erkennbaren germanischen Ursprung. Das eigentliche lateinische Wort für „weiß“ war dagegen *albus* (vergleiche Album), was im portugiesischen „alvo“ („weiß“, „rein“), im rumänischen „alb“ („weiß“) und im spanischen „alba“ („Morgengrauen“) fortlebt.

Das aus älteren (süd)französischen Varietäten bekannte Farbwort „azur“ (vgl. „Côte d'Azur“) findet sich auch in italienisch: „azzurro“ und spanisch: „azul“ wieder. Originär Italienisch Sprechende empfinden „blu“ (Dunkelblau) und „azzurro“ (Himmelblau) als völlig verschiedene Grundfarben, etwa wie gelb und grün für einen Deutschsprachigen unterschiedliche Farben darstellen. Für die Römer war der Himmel nicht „blau“, sondern „hell“.

Im Griechischen steht „χλωρός“ (chloros) für „gelb-grün“ (vgl. das Element Chlor und Chlorophyll), „γλαυκός“ (glaucos) ist ein stumpfes „blau-grau-grün“ (vgl. hierzu Glaukom).

Die Japanische Sprache kennt außer der Entlehnung von „grün“ (green) aus dem Englischen keine *Kategorie Grün*, vielmehr wird „grün“ als (gelbe) Schattierung von Blau angesehen (Ausbausprache).

Die Chinesische Sprache unterscheidet zwei Arten von Grün: 綠色(lü se) oder nur 綠(lü) für ein helles, eher gelbliches Grün und 青色(qing se) für ein sattes, ins Bläuliche übergehendes Grün, Türkis oder Cyan.

Weitere Farbräume und -modelle

- RGB-Farbraum
- CMYK-Farbmodell
- HSV-Farbraum

Literatur

- Harald Küppers: *Das Grundgesetz der Farbenlehre*. 10. Auflage. DuMont, Köln 2002.

Weblinks

- Küppers' Farbenlehre ^[10]
- Zusammenstellung von Farbsehtests ^[26]
- Umfangreiche Arbeit über Farben/Farb Wahrnehmung im Allgemeinen (physikalisch und biologisch), ihre Wirkung am Beispiel der Farbe Rot ^[3]
- do "primary" colors exist? ^[4] - Informationen zum Thema "Grundfarben" in Englisch

Einzelnachweise

- [1] Rudolf Arnheim, Kunst und Sehen - Eine Psychologie des schöpferischen Auges, de Gruyter 2000
[2] vergleiche den Kinderliedtext: ›Safran macht den Kuchen gel‹
[3] <http://archiv.christoph-hoffmann.de/ESS/Semi/ROT.pdf>
[4] <http://www.handprint.com/HP/WCL/color6.html>
-

Grün

Grün

Grün ist der Farbreiz, der wahrgenommen wird, wenn Licht mit einer spektralen Verteilung ins Auge fällt, bei dem das Maximum im Wellenlängenintervall zwischen 520 und 565 nm liegt. Licht mit dieser Eigenschaft kann auch als Körperfarbe remittiert sein.

Farblehre

Giftgrün

Olivgrün

Die Farbe **Grün** ist eine der Grundfarben der Additiven Farbmischung (neben Rot und Blau). Bei subtraktiver Farbmischung erreicht man Grün durch Mischung der Farben Cyan und Gelb. Die Komplementärfarbe ist Magenta. Die Liste grüner Farbmittel enthält die Farbkörper zum Einfärben.

Natur



Kastanie im Frühlingsgrün (Vielfalt von Absorptionen im Rotbereich)

Da viele Pflanzen Chlorophyll enthalten, ist Grün in der Natur eine häufige Farbe. Ein Begriff dafür ist Grasgrün. Am Ende der Vegetationszeit verringert sich das Chlorophyll, gelbe und rote Farbstoffe kommen zum Vorschein (Indian Summer).

Als Hauptfarbe der Vegetation wird mit der Farbe Grün Leben und Wachstum assoziiert. In der Natur begegnet es uns besonders im Frühling und kündigt den Beginn neuen Wachstums an. Grün ist so die Farbe der Frische und der Natürlichkeit wie auch der Hoffnung und der Zuversicht. Viele Menschen erhoffen sich gerade im Frühling positive Veränderungen in ihrem Leben. Im Winter holt man sich Tannengrün ins Haus und dekoriert damit die Stuben und Fenster.

Das *Ergrünen* (im Frühjahr) wird mit der Farbe Grün verbunden. So stand sie im Mittelalter als Symbol für eine beginnende Liebe. Daraus entstanden *die grüne Seite* und – als Verneinung – die Redensart *jemandem nicht grün sein*. Der älteste Beleg findet sich in einer mittelalterlichen Passion über die heilige Katharina, in der es über ihre Feinde heißt: *Was gegen ir vil ungrune*.



Walnussbäumchen im Garten

Umweltschutz

Aus dem Grün der Pflanzen dem Chlorophyll und der Bedeutung Natur entstand die Symbolik für Umweltschutz für Natur und Umweltschutz. Es ist die Symbolfarbe der Partei Die Grünen und deren Namensgeber.

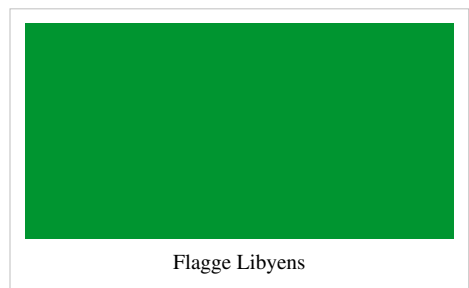
In Anlehnung an den Naturbezug wird Grün auch für Nachhaltigkeit und Menschen- und Bürgerrechte als Symbol genutzt. Green Goal aus englisch *Grünes Tor* wird für Umweltschonung bei Fußballgroßveranstaltungen verwendet. Weitere Begriffe mit diesem Bezug sind „Grüne Ökonome“, „Grüne Informationstechnologie“, „Green Technology“.

Christentum

Im Christentum ist Grün die Farbe der Auferstehung, es ist die Osterfarbe und hat den Bezug im Frühlingsgrün. In Irland steht Grün für den Katholizismus (siehe St. Patrick's Day). Bischöfe führen in ihrem Wappen einen grünen Prälatenhut, weil die Bischofsfarbe bis 1867 grün war.

Islam

Grün ist die Farbe des Islam. Der Prophet Mohammed soll sich bevorzugt grün gekleidet haben. Dementsprechend sind Schmuckelemente in Moscheen bevorzugt in grün gehalten. Die Flaggen vieler islamischer Staaten enthalten Grün, darunter die Flaggen von Libyen und Saudi-Arabien.



China

In China ist die Farbe Grün Symbol für Leben, Frühling und Osten. Die Zuordnung der Farben zu anderen Dingen und Erscheinungen wird in der Fünf-Elemente-Lehre getroffen.

Signalfarbe

Grün bezeichnet als Signalfarbe das Normale, Unproblematische, Positive oder Ordnungsgemäße. Grün wird benutzt, um Vorgänge zu kennzeichnen, die funktionieren oder erlaubt sind. So steht *Grünes Licht* auch für die Freigabe eines Vorganges (Verkehrsampel). Bei einer grünen Welle sind die Ampeln eines Straßenzuges in Grünphase.

Auf der Messskala von Anzeigeinstrumenten gibt es häufig den *grünen Bereich*^[1], der den ordnungsgemäßen Betrieb markiert, im Gegensatz zum *roten Bereich* für einen unerlaubten Zustand. Bei technischen Geräten signalisiert eine grüne Leuchtdiode meist den Betrieb, und eine rote Stillstand. Auch bei Bedientasten, beispielsweise am Handy, hat sich diese Farbgebung durchgesetzt.

Gift

Intensive Grüntöne werden als Giftgrün bezeichnet. Das geht darauf zurück, dass lange Zeit alle farbintensiven und dauerhaften Grünpigmente – außer dem teuren Edelstein Malachit – giftige Pigmente waren, allen voran das arsenhaltige Schweinfurter Grün, aber auch beispielsweise Chromgrün, Kupferacetat (auch Grünspan genannt) und andere Kupferpatinen. Als weniger giftige Pigment standen nur wenig farbintensive grüne Erden zur Verfügung. Die Bezeichnung *giftgrün* wurde von den Brüdern Grimm in deren Wörterbuch anhand einer Schrift Siegmund Suevus (*Spiegel des menschlichen Lebens*) bereits für das Jahr 1588 nachgewiesen.^[2]

Die Gesichtsfarbe grün (=fahl) steht wegen des fehlenden Blutrots für Krankheit, sowohl von Körper als auch für die kranke Seele. In diesem Sinne ist die Farbe Grün als „giftig“ in der traditionellen abendländischen Kultur zusätzlich besetzt. Grün steht für Gier und falschen Neid, wie in der Redensart „Grün ist die Gier“ oder umgangssprachlich

auch „Grün vor Neid“ (neben Gelb vor Neid).^[3]

Verkehr

Automobile

Anfang des 20. Jahrhunderts wurden bei Rennsportveranstaltungen für die Wagen der einzelnen Nationen Farben vorgegeben. Für britische Fahrzeuge war grün zu verwenden. Das sogenannte *British Racing Green* gehört noch heute zu den klassischen Farben, in denen britische Fahrzeuge angeboten werden.

Ampel

Das Ampelgrün signalisiert Erlaubnis im Sinne der bejahenden Wirkung des Farbtones.

Eisenbahn

Ein dunkler Grünton (flaschengrün, chromoxidgrün, tannengrün) wurde seit Ende des 19. Jahrhunderts bei vielen Eisenbahngesellschaften zur Standardfarbe für Reisezugwagen, teilweise auch für Lokomotiven, vor allem Elektrolokomotiven. Vorteile der dafür wirtschaftlich einsetzbaren Pigmente waren gute Lichtbeständigkeit und geringe Schmutzanfälligkeit. Seit den 1970er Jahren wurden die grünen Anstriche zunehmend von helleren und kräftigeren Farben verdrängt. Zu den genauen Farbtönen siehe auch Eisenbahnfarben.

Kampfsport

In vielen Kampfkünsten – wie Jiu Jitsu, Judo und Karate – wird ein Gürtel (jap. Obi) als Teil der Kampfsportkleidung (jap. Keikogi) getragen. Der grüne Gurt repräsentiert den Kenntnisstand des Budōka und ist den unteren bis fortgeschrittenen Schülergraden (jap. Kyū-Grad) vorbehalten.

Heraldik

In der Heraldik (Wappenkunde) zählt Grün zu den klassischen Tinkturen und gilt als Farbe, im Unterschied zu den Metallen Gold und Silber.



Budo-Gürtel (jap. Obi) in den Farben der fünf Schülergrade (jap. Gokyū)

Siehe auch

- Grün und blau in verschiedenen Sprachen
- Grünland ist die landwirtschaftlich genutzte Fläche mit Gräsern als Dauerkultur.
- Grünspan ist ein anderer Name für Kupferacetat und wird fälschlich für die Überfärbung von Kupferblechen durch basische Kupferverbindungen, die Kupferpatina genutzt.
- Grüner Blitz ist ein Naturphänomen.
- Dasselbe in Grün
- Esperantoflagge ist in grün gehalten.
- Im Golf ist Grün das Zielgebiet.

Literatur

- Eva Heller: *Wie Farben wirken*. Farbpsychologie, Farbsymbolik, Kreative Farbgestaltung. 3. Auflage. Rowohlt, Reinbek bei Hamburg 2006 (1. Auflage 1999), ISBN 978-3-499-61960-1, S. 71–85.

Weblinks

- T. Seilnacht: *Grün: Geschichte und Bedeutung* ^[4]. In: *Naturwissenschaftliches Arbeiten* www.seilnacht.com – *Seilnachts Didaktik der Naturwissenschaften*. Abgerufen am 9. November 2009.
- Katharina Andres-Wilhelm: *Vom Rätsel und der Pracht der Farbe Grün* ^[5]. In: www.modeschule-metzingen.de. Abgerufen am 9. November 2009.
- *Assoziationen zur Farbe Grün* ^[6]. In: metacolor.de. Abgerufen am 9. November 2009.
- *Farbimpulse* ^[7]. Abgerufen am 9. November 2009.
- *Farbanmutungen nach Nationen – kulturspezifische Farbbedeutungen* ^[8]. Abgerufen am 9. November 2009.

Einzelnachweise

- [1] siehe
- [2] Grimmsches Wörterbuch (http://germazope.uni-trier.de/Projects/WBB/woerterbuecher/dwb/wbgui?lemmode=lemmasearch&mode=hierarchy&textsize=600&onlist=&word=giftgrun&lemid=GG16325&query_start=1&totalhits=0&textword=&locpattern=&textpattern=&lemmapattern=&verspattern=#GG16325L0)
- [3] Redensarten-Sammlung ([http://www.redensarten-index.de/suche.php?suchbegriff=gruen&bool=relevanz&suchspalte\[\]=rart_ou](http://www.redensarten-index.de/suche.php?suchbegriff=gruen&bool=relevanz&suchspalte[]=rart_ou))
- [4] <http://www.seilnacht.com/Lexikon/Gruen.htm>
- [5] <http://www.gewerbeschule-metzingen.de/ceasy/modules/core/resources/main.php?id=603>
- [6] <http://www.metacolor.de/farben/gruen.htm>
- [7] <http://www.farbimpulse.de/farbwirkung/detail/0/45.html>
- [8] http://www.farbenundleben.de/kultur/kulturen_farbbeutungen.htm



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Helligkeit

Helligkeit ist ein Überbegriff subjektiver Eindrücke und objektiver Messgrößen für die Stärke einer visuellen Wahrnehmung von – sichtbarem – Licht.

Helligkeit als Sinnesempfindung

Die Worte *Helligkeit* und *Dunkelheit* (auch *Finsternis*) werden meist für die subjektive Lichtempfindung benutzt, wie sie auf das Auge des Beobachters wirkt^[1] – Dunkelheit ist einfach ein niedriger Messwert an Helligkeit.

Dabei umfasst der Begriff zwei Konzepte:

- das gesamte Licht, das ins Auge einfällt, was man dann als *Lichtverhältnisse* oder *Beleuchtung* bezeichnet
- die von einer *Lichtquelle* ausgestrahlte Lichtmenge, unabhängig davon, ob sie selbstleuchtend ist (Licht emittiert), oder nur eine Beleuchtung reflektiert



Abnahme der Helligkeit mit der Tiefe

Die meisten höheren Lebewesen haben zwei – im allgemeinen getrennt – arbeitende Systeme des visuellen Systems: Die normalen Lichtverhältnisse werden als *photopischer Bereich* bezeichnet (*Tagsehen*), Sehen bei Dämmerlicht als *mesopischer*, Nachtsehen als *skotopischer Bereich*. Unterhalb der Sehschwelle des skotopischen Bereichs nimmt ein Auge nichts mehr wahr, es herrscht Finsternis – auch wenn die Beleuchtungs- bzw. Lichtstärke noch nicht Null ist (Restlicht). Übermäßige Helligkeit führt zu Blendung, der Sehsinn versagt. Die Farbwahrnehmung funktioniert nur mit genügend Licht (photopischer Sehbereich), darunter werden nur Grautöne wahrgenommen, darüber nur „Weiß“. Die physiologischen Schwellen des Sehens sind bei allen Lebewesen extrem unterschiedlich, auch beim Menschen schwanken sie relativ deutlich.

Objektivierung der Helligkeit

Die Sinnesempfindung der Helligkeit ist etwa dem Logarithmus des Reizes proportional – sie folgt wie viele andere neurologische Prozesse dem *Weber-Fechner-Gesetz*. Sie kann aber bei verschiedenen Personen etwas unterschiedlich sein. Insbesondere hängt sie von der spektralen Empfindlichkeit für Tagesehen (photopisches Sehen) der Sehzellen für mittlere Wellenlängen ab, die bei den meisten Menschen im Bereich um 555 nm Wellenlänge (grün) am höchsten ist (Maximum der Sonnenstrahlung), bei vielen Tieren aber zu anderen Farben verschoben ist (z. B. Katzen oder Bienen). Die genauere Verteilung der Helligkeitsempfindlichkeit des menschlichen Sehapparats in Abhängigkeit von der Lichtfarbe beschreibt die V-Lambda-Kurve.

Das menschliche Auge arbeitet in einem sehr großen Helligkeitsbereich, der Lichtintensitäten von 1 : 10 Milliarden entspricht (Sehschwelle 10^{-13} Lumen^[2]). Dennoch können wir verschiedene Helligkeiten als unterschiedlich wahrnehmen, sobald sich ihre Lichtmenge um mehr als 10 % unterscheidet. Darauf beruht die *fotometrische Stufenmethode* für scheinbare Helligkeiten, die der Astronom Friedrich Argelander um 1840 entwickelt hat.

Will man Helligkeiten objektiver bestimmen, sind zwei Effekte besonders zu berücksichtigen:

1. die individuellen Eigenschaften des Auges
2. gleichzeitige Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich und im angrenzenden Infrarot bzw. UV.

Der Begriff *Helligkeit* versteht sich dann allgemeiner als Intensität der auf einen Beobachter oder Sensor wirkenden Strahlung, die räumlich und über ein Frequenzband mit benachbarter elektromagnetischer Strahlung gemittelt wird.

- In der Astronomie ist diese Mittelung von Bedeutung, wenn die *relativen (scheinbaren)* oder *absoluten Helligkeiten* von Sternen oder anderen astronomischen Objekten ermittelt werden. Die je nach vorherrschender Lichtfarbe unterschiedliche *visuelle* bzw. *fotografische Helligkeit* wird hier z. B. um einen Farbindex ergänzt.
- In der Farblehre ist die *farbmetrische Helligkeit* auf eine Vergleichsfarbe, etwa ein Referenzweiß oder ein Schwarz oder Grau bezogen, um die Effekte von Hintergrundbeleuchtung (Umgebungscontrast) und Gesamtlichteinfall (bzw. der Adaptation des Auges daran) auszuschalten und in einem dreidimensionalen Farbraum arbeiten zu können.

Physikalische Definition

Als rein physikalische Messgröße wird die *Helligkeit* von der *Photometrie* durch die Lichtstärke ersetzt, welche die von einem Objekt ausgehende, spektral gemittelte Strahlung in der Maßeinheit Candela (cd) angibt.

Die Helligkeitsskala kann auch durch die Energie des einfallenden Lichtes definiert werden, womit die o. a. Subjektivität bei der Wahrnehmung von Flächen- oder Sternhelligkeiten wegfällt. Wenn m die Magnituden und L die gemessenen Lichtströme zweier Sterne sind, ist ihr Helligkeitsunterschied

$$\Delta m = m_1 - m_2 = -2,5 \cdot \log(L_1/L_2)$$

Für $\Delta m = 1$ entspricht dies einem Verhältnis der Lichtenergie von $1 : 2,512$ bzw. einem Logarithmus von 0,4.

- Als Referenzwert der Astronomie dieser an sich relativen Skala dient 2,1 mag für den Polarstern, bzw. Null für die Wega (hellster Stern des Nordhimmels), womit die seit 2000 Jahren übliche *Helligkeitsskala* des Hipparchos für moderne Messinstrumente und auch für helle Objekte (wie die Sonne) adaptiert ist.
- Die Farbmetrik verwendet für diesen Zweck das Referenzweiß, oder ein Schwarz an der Sehschwelle.

Die Unterscheidung zwischen Ausleuchtung und Helligkeit einer Lichtquelle quantifiziert man im *Emissionsgrad* bzw. *Remissionsgrad*, in bezug auf Beleuchtung als *hemisphärischen*, auf Lichtquellen als *gerichteten Grad*, alle jeweils als auf einen Ausschnitt des Spektrum bezogen, oder das Gesamtspektrum. Aus diesen leiten sich dann, jeweils bezogen auf eine Zeiteinheit oder eine Raumwinkeleinheit des Sichtfelds oder beide, die photometrischen Grundgrößen ab. Je nach Kontext spricht man auch von einer physikalischen Größe der ‚Beleuchtung‘ (etwa Leuchtdichte) oder des ‚Lichts‘ (etwa Lichtintensität).

Die Größen des Lichts/der Beleuchtung und die der Strahlung unterscheiden sich um die durch die V-Lambda-Kurve gewichteten spektralen Anteile, wie sie der Sehsinn verarbeiten kann, weil *Licht* – als ‚wahrnehmbare Strahlung im optischen Bereich‘ – kein (rein) ‚physikalisches‘, sondern ein physiologisches Phänomen ist. Nimmt man konkret Bezug auf den Sehapparat – ob ein biogenes Auge oder ein technischer Sensor – legt man die Strahlungsgrößen zugrunde (etwa den Strahlungsfluss statt dem Lichtstrom).

Siehe auch

- Beleuchtungsstärke
- Lux (Einheit) mit Umrechnungsbeispielen in andere Einheiten
- Luminanz
- Licht
- Farbtemperatur
- Fotometrie
- Grauwert
- Sichtbarkeit

Literatur

- H.Schober: *Das Sehen*, Band I (z. T. Band II). VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1957 und 1964
- G.Gerstbach: *Auge und Sehen - der lange Weg zu digitalem Erkennen*. Sternenbote Heft 11/99, p.142-157, Wien 1999
- A.Schödlbauer: *Geodätische Astronomie – Grundlagen und Konzepte*. 634 p., De-Gruyter-Verlag, Berlin 2000.

Einzelnachweise

[1] siehe Lit.: Schober, 1957/1964

[2] siehe Lit.: Gerstbach, 1999

Infrarotstrahlung

Als **Infrarotstrahlung** (kurz IR-Strahlung, auch *Ultrarotstrahlung*) bezeichnet man in der Physik elektromagnetische Wellen im Spektralbereich zwischen sichtbarem Licht und der längerwelligen Terahertzstrahlung. Als Infrarot wird der Spektralbereich zwischen $7,8 \times 10^{-7}$ m und 10^{-3} m (780 nm und 1 mm) bezeichnet, was einem Frequenzbereich von 3×10^{11} Hz bis ca. 4×10^{14} Hz entspricht.



Ein Baum vor dem Lehmbruckmuseum in Duisburg (Aufnahme des sichtbaren Spektralbereiches)



Dasselbe Motiv fotografiert unter Verwendung eines IR-Transmissionsfilters (Powershot A70 + Hoya 780), aufgezeichnet wird nur Infrarot im Bereich von 700–1000 nm (Falschfarbendarstellung)

Einteilung des Spektralbereichs

Eine Einteilung des Spektralbereiches beruht auf den Arten der Molekülschwingungen, die sich auf die Anwendungen auswirken. Die Begriffe sind nicht so eindeutig wie im sichtbaren Bereich definiert und werden teils durch die Anwendungen oder spezielle physikalische Phänomene bestimmt, weshalb es mehrere unterschiedliche Bezeichnungen gibt. Das International Commission on Illumination (CIE) und DIN^[1] schlagen die Einteilung in drei Bänder vor: IR-A, IR-B und IR-C (MIR und FIR).

Einteilung der Infrarotstrahlung nach DIN 5031^[1]

Benennung	Kurzzeichen		Wellenlänge in μm	Temperatur nach Wien	Einsatzbereiche/Bemerkungen
nahes Infrarot	NIR	IR-A	0,78...1,4	3700 K...	<ul style="list-style-type: none"> kurzwelliger Teil des NIR-Bereichs, 780-nm-Grenze bedingt durch den dem Sonnenspektrum angepassten menschlichen Sehsinn. photographisches Infrarot (ColorInfraRed, CIR) liegt bei 0,7–1,0 μm: Fotografischer Film kann diesen Wellenbereich aufnehmen.
		IR-B	1,4...3,0		<ul style="list-style-type: none"> langwelliger Teil des NIR-Bereichs die Begrenzung ist in der Wasserabsorption bei 1450 nm begründet.
mittleres Infrarot	MIR	IR-C	3...50	1000...60 K	<ul style="list-style-type: none"> Bereich thermischer Strahlung bei irdischen Temperaturen
fernes Infrarot	FIR		50...1000	...3 K	<ul style="list-style-type: none"> Die Atmosphäre absorbiert hier stark, an der Grenze zum Mikrowellenbereich wird gerade noch die kosmische 3-Kelvin-Strahlung sichtbar.

Eine andere Unterteilung, die häufig im angloamerikanischen Raum sowie bei der Spezifikation von Erderkundungskameras angewandt wird:

- *nahes Infrarot* (englisch: near infrared, NIR) ist kurzwellige IR-Strahlung, die sich direkt an den sichtbaren (roten) Bereich anschließt von 780 nm bis 1400 nm.
- *kurzwelliges Infrarot* (englisch: short wavelength, SWIR) 1,4 bis 3,0 μm
- *mittleres Infrarot* (englisch: mid wavelength, MWIR) schließt daran an bei Wellenlängen von 3,0 μm bis 8 μm .
- *langwelliges Infrarot* (englisch: long-wavelength, LWIR) 8 bis 15 μm
- *fernes Infrarot* (englisch: far infrared, FIR) ist langwellige IR-Strahlung von 15 μm bis 1 mm und überschneidet sich mit dem Bereich der Terahertzstrahlung.

Geschichte

Die IR-Strahlung wurde um 1800 vom deutsch-britischen Astronomen, Techniker und Musiker Friedrich Wilhelm Herschel bei dem Versuch entdeckt, die Temperatur der verschiedenen Farben des Sonnenlichtes zu messen. Er ließ dazu Sonnenlicht durch ein Prisma fallen und platzierte ein Thermometer in den einzelnen Farbbereichen. Dabei bemerkte er, dass jenseits des roten Endes des sichtbaren Spektrums das Thermometer die höchste Temperatur anzeigte. Aus dem beobachteten Temperaturanstieg schloss er, dass sich das Sonnenspektrum jenseits des Roten fortsetzt.

IR-Quellen

Umgangssprachlich wird IR-Licht oft mit Wärmestrahlung gleichgesetzt, auch wenn sowohl Mikrowellen als auch sichtbares Licht, wie der ganze elektromagnetische Spektralbereich, zur Wärmestrahlung beitragen. Breitbandige IR-Quellen sind thermische Strahler wie beispielsweise Glühlampen und Heizstrahler (s. a. Keramischer Infrarotstrahler). Unterschiedliche Infrarotstrahler wurden entwickelt, um damit die Vielfalt der Anwendungen der Infrarotstrahlung spezifischer abzudecken, beispielsweise Globar und Nernst-Stift.

Nachweis der Strahlung

Zum Nachweis von IR-Strahlung aller Wellenlängen eignen sich thermische Detektoren (Thermoelemente oder Bolometer). Im kurzwelligen Bereich werden Halbleiterdetektoren verwendet – auch Digitalkameras eignen sich dafür, wenn ihr IR-Sperrfilter nicht zu stark ausgelegt ist. Zur Aufnahme von IR-Bildern im nahen Infrarotbereich eignen sich auch spezielle fotografische Filme. Bei längeren Wellenlängen (mittleres Infrarot) werden gekühlte Halbleiterempfänger oder pyroelektrische Sensoren (Anwendung z. B. im PIR-Bewegungsmelder) verwendet.

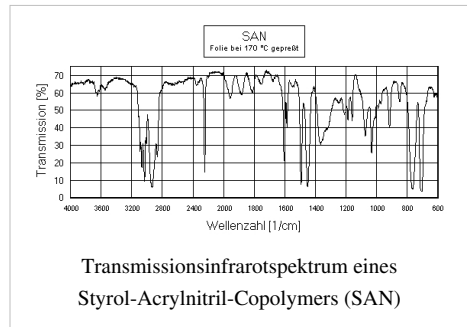
Anwendungen

Heizung

Eine wesentliche Anwendung ist die Heizung durch Strahlung. Jeder Heizkörper sendet auch infrarote Strahlung aus, insbesondere bei Temperaturen deutlich über 100 °C. Darunter überwiegt meist die Wärmeabgabe an die Luft; allerdings steigt die Behaglichkeit durch den Strahlungsanteil. Komplette Hausheizungen oder Übergangsheizung im Bad werden mittels Infrarot-Panels ausgeführt; die Raumstation MIR wurde seit 1986 auf diese Art beheizt.

Chemische Analytik und Verfahrenstechnik

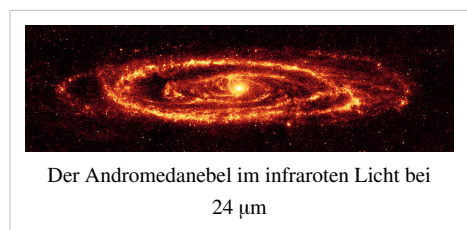
Infrarotstrahlung regt Moleküle zu Schwingungen und Rotationen an. Die Infrarotspektroskopie ist ein physikalisch-chemisches Analyseverfahren. Die Absorption von infrarotem Licht definierter Wellenlängen wird zur Strukturaufklärung unbekannter Substanzen eingesetzt. Durch quantitative Bestimmung lässt sich die Reinheit von bekannten Substanzen bestimmen. Bei der Abfalltrennung lässt sich die Infrarotspektroskopie zur Erkennung und Trennung von Kunststoffen einsetzen.



Die Absorptionszentren der Molekülschwingungen sind direkt mit der Brechzahl der Materialien und somit ihrem Reflexionsverhalten verknüpft. Im infraroten Bereich wird dies unter anderem bei der Infrarotreflektographie ausgenutzt. Die Infrarotreflektographie ist eine hauptsächlich in der Kunstwissenschaft angewandte Untersuchungsmethode, mit der sich über die unterschiedlichen Reflexionseigenschaften der auf einem Malträger aufgetragenen Farben Zeichnungselemente aus stärker reflektierenden Stoffen sichtbar machen lassen. Mit dieser berührungs- und zerstörungsfreien Technik ist es zum Beispiel möglich, die obere Malschicht eines Gemäldes zu durchdringen und die sonst nicht sichtbare Unterzeichnung zu dokumentieren.

Astronomie

In der Infrarotastronomie beobachtet man „kühle“ Objekte (kälter als 1000 K), die in anderen Spektralbereichen kaum zu sehen sind, oder Objekte, die in oder hinter einer interstellaren Wolke liegen. Zusätzlich hilft die IR-Spektroskopie bei der Analyse der betrachteten Objekte. Hierbei werden wie in der Chemie mittels Infrarotspektroskopie Banden bestimmter Substanzen nachgewiesen, so z. B. Methangas auf dem Exoplaneten bei Fixstern HD 189733.



Elektronik und Computertechnik

Infrarotfernbedienungen, Optokoppler und die meisten Lichtschranken arbeiten im nahen Infrarot bei 880 bis 950 nm Wellenlänge, da hier Silicium-Fotodioden und Fototransistoren ihre höchste Empfindlichkeit haben. Infrarotschnittstellen von Computern arbeiten ebenfalls in diesem Wellenlängenbereich und ermöglichen eine drahtlose Kommunikation mit Peripheriegeräten. Die optische Datenübertragung mittels IR-Laser durch die Atmosphäre wird durch die optische Freiraumübertragung charakterisiert.



Dabei war die Firma Hewlett Packard eines der ersten Unternehmen, das die Infrarottechnik mit der EDV verbunden hat. Im Jahre 1979 integrierte man dort erstmals eine IR-Schnittstelle in einen Taschenrechner, um so eine Verbindung zu einem Drucker herzustellen. Im Jahre 1990 wurde dann erstmals eine IR-Schnittstelle in einen Personal Computer integriert. Diese Schnittstelle wurde zu einem ersten Standard. Da sie seriell arbeitete, wurde sie *Serial Infrared* (Seriellles Infrarot), abgekürzt *SIR* benannt. Aus Geschwindigkeitsgründen ist dieser Standard heutzutage durch das abwärtskompatible Fast-IR abgelöst, welches bei PCs jedes Desktop-Mainboard ab ungefähr Baujahr 2002 unterstützt (bzw. für den Anschluss eines solchen Senders/Empfängers vorbereitet ist). PDAs und Notebooks (bis ungefähr Baujahr 2006) haben ein solches Infrarotgerät eingebaut, ebenso wie einige Mobiltelefone (hier gilt für die neueren dasselbe wie für Notebooks). Die Infrarotschnittstellen werden zunehmend durch Bluetooth ersetzt.

In der Telekommunikation wird IR-A aufgrund der geringen Absorption und Dispersion in Glasfasern bevorzugt verwendet; Die Standardwellenlänge liegt in der optischen Datenübertragung mittels Glasfasern bei 1550 nm.

Mittels Wärmebildsensoren kann auch die Bewegungserkennung einer Infrarotstrahlungsquelle erfolgen. Dies wird beispielsweise für die Steuerung der Spielekonsole Wii von Nintendo genutzt.^[2]

Vegetation

Im nahen Infrarot besitzt die grüne Vegetation eine ungefähr sechsfach höhere Reflexion als im sichtbaren Spektralbereich, da frisches Blattgewebe ein gutes Reflexionsvermögen aufweist und die übrigen Wellenlängen vom Chlorophyll und den begleitenden Karotinoiden absorbiert werden. Dieser Effekt wird zur Erkennung von Vegetationsflächen genutzt. Es werden von einer Szene zwei Bilder genommen, eines im sichtbaren, das andere im nahen infraroten Bereich. Häufig werden Multispektralkameras verwendet. Durch Division beider Bilder wird die Vegetation deutlich sichtbar und kann leicht segmentiert werden.

Die auf diese Weise erkannte Vegetation wird von einem Fahrzeug oder Flugzeug vermessen. Die Vergleichsmessung von Vegetation in Innenräumen beobachtet eine Pflanze über einen längeren Zeitraum. Die Vermessung der Vegetation von Fahrzeugen aus gibt eine Aussage über die lokal vorherrschenden Bedingungen. Die Bestimmung des Flächenanteils der Vegetation zur gesamten Grundfläche aus der Luft aufgenommener Bilder ist ein häufiger Fall. Das Vegetationsvolumen innerhalb eines vordefinierten Raumes wird bestimmt. Diese Volumenvermessung von Vegetation ist für Autobahn- und Straßenmeistereien sowie Betreiber von Schienennetzen von Bedeutung. Vegetation die in das Lichtraumprofil von Fahrzeugen hineinragt wird automatisch erkannt und der Rückschnitt kann veranlasst werden.

Über die spektrale Reflexion insbesondere im nahen bis fernen Infrarot von grüner Vegetation werden Vegetationstypen unterschieden, der jeweilige Gesundheitszustand der Vegetation wird erkannt. Der Gesundheitszustand der Pflanzen hängt in erster Linie von ihrer Wasserversorgung ab. Gemessen wird die Trockenheit, Pilz- und Insektenbefall ist zu erkennen.

Medizin

Heizlampen strahlen im Infraroten und sind schon seit langem für medizinische Zwecke im Einsatz.

Wärmestrahlung von Heizstrahlern (keramische Infrarotstrahler mit langwelliger IR-Strahlung, Rotlichtlampen, die vorrangig nahes IR emittieren) wird zur örtlichen Behandlung von Entzündungen (Nasennebenhöhlen) eingesetzt. Für die Ganzkörper-Behandlung siehe Infrarotwärmekabine. Neben Infrarotwärmekabinen gibt es mittlerweile auch mobile Geräte, wie der Marke „Melting Dome“, für die Bestrahlung mit kurzwelliger IR-Strahlung für Ganz- und Teilkörperanwendung. Hierbei handelt es sich um großflächige, tunnelartige Geräte, die um die entsprechenden Körperpartien werden. Auf diese Weise erreicht ein hoher Anteil an Infrarot-A-Strahlung den Körper.

Infrarotstrahlung wird in der Medizin auch häufig in Form von Lasern genutzt. Die Einsatzgebiete umfassen dabei insbesondere die Haut-, Augen- und Zahnheilkunde (Messen, Veröden, Schneiden, Koagulieren, Lichttherapie).

Nahes Infrarot dringt tief in und unter die Haut ein, während insbesondere MIR bereits an der Oberfläche der Haut und der Hornhaut des Auges absorbiert wird. Nahes Infrarot hoher Intensität (Laserstrahlung) ist daher besonders gefährlich für Augen und Haut, da es im Auge unbemerkt bis zur Netzhaut gelangt, dort fokussiert wird und Zerstörungen verursacht. Am Körper wird es in Regionen absorbiert, in denen sich keine Temperatursensoren befinden und kann daher dort ebenfalls oft unbemerkt Schäden verursachen.

Zur Fiebermessung werden Pyrometer verwendet, die die Temperatur im Ohr anhand der Wärmestrahlung im mittleren Infrarot messen.

Zum Auffinden lokaler Entzündungsherde werden Thermografieaufnahmen herangezogen.

Zur Messung der Sauerstoffsättigung roter Blutkörperchen dient die Pulsoxymetrie.

Verkehr, Polizei und Militär

Im Auto kann eine Infrarotkamera (NIR-Bereich) genutzt werden, um die Sicherheit bei Nacht- und Nebelfahrten zu erhöhen. Hierbei wird das IR-Bild dem Fahrer auf einem Display angezeigt. Die Systeme werden auch als „Night Vision“ bezeichnet, und es wird behauptet, dass sie eine deutlich erhöhte Sicherheit bei schlechten Sichtverhältnissen ermöglichen, da die Durchdringungsfähigkeit und Reichweite des infraroten Anteiles der mit Glühlampen arbeitenden Autoscheinwerfer im IR-Bereich wesentlich höher als im sichtbaren Bereich ist.

Jäger, Polizei und Militär nutzen tragbare Nachtsichtgeräte und Restlichtverstärker im Nahen Infrarot (zentrales Bauteil: Bildverstärker), um in der Dunkelheit sonst unsichtbare Objekte erkennen zu können, wobei auch zusätzliche Infrarotbeleuchtung eingesetzt werden kann. Hubschrauberpiloten (der Polizei und des Militärs) fliegen nachts mit Hilfe einer am Helm befestigten Nachtsichtbrille, bei der vor jedem Auge ein einfarbiges Abbild der Wärmeabstrahlung von Objekten am Boden erzeugt wird. Außen am Helikopter kann eine bewegliche Kamera montiert sein, die im sichtbaren wie auch im infraroten Lichtspektrum Videobilder liefert. Diese werden zum Beispiel bei der Suche nach vermissten oder flüchtigen Personen auch in der Dunkelheit benutzt. ^[3]



Am Helm eines US-amerikanischen Soldaten der 2. Stryker-Brigade befestigtes Nachtsichtgerät.

Viele Typen selbständig zielsuchender Lenkflugkörper finden ihr Ziel über Wärmestrahlung, wie sie z. B. von Flugzeugtriebwerken ausgesandt wird. Zur Abwehr verfügen neuere Kampfflugzeuge und Militärschiffe über Einrichtungen, die Täuschkörper (Flares) ausstoßen, um diese Waffen vom Flugzeug bzw. Schiff wegzuleiten.

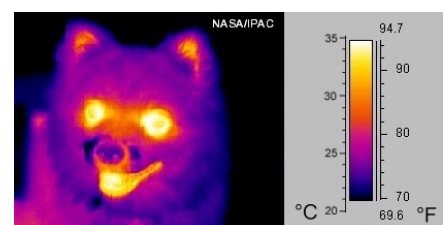
Thermografie

Mit Hilfe der Thermografie lassen sich „Wärmebilder“ erzeugen, für die die Infrarotstrahlung der Wärme von Gegenständen genutzt wird.

Eine besondere Anwendung ist die Bauthermografie zur Qualitätssicherung und Visualisierung von Wärmebrücken und Wärmeverlusten an Gebäuden. Im Ergebnis können dann wärmedämmende Maßnahmen gezielt eingesetzt werden.

In der Diagnose und Instandhaltung von elektrischen, elektronischen und mechanischen Baugruppen, Anlagen oder Maschinen wird die Thermografie als ergänzende Messmethode zur präventiven Mängel-

und Schadenserkenkung eingesetzt. Berührungslos können damit kritische Zustände („Hot Spots“) von Maschinen, Anlagen und Installationen während des Betriebes ermittelt werden. Dadurch können bereits frühzeitig Maßnahmen



Eine Infrarotfotografie (MIR, um 10 μm) eines kleinen Hundes (Falschfarbendarstellung)

zum Begrenzen der Wirkungen getroffen und somit ggf. Ausfälle und Schäden vermieden werden.

Die Thermografie wird bei der Schwingungsanalyse und Festigkeitsprüfung eingesetzt. Risse und lose Verbindungen verraten sich durch ihre Wärmeentwicklung.

Mit Infrarot-Pyrometern werden berührungslos Prozesstemperaturen und Temperaturen von Bauteilen und Kühlkörpern gemessen und kontrolliert.

Die Feuerwehr benutzt tragbare Wärmebildkameras zum Aufspüren von Brandherden und Glutnestern oder zu rettenden Personen in verrauchten Innenräumen.

Materialbearbeitung

Viele thermische Verfahren in der Industrie werden durch Infrarotstrahlung vorgenommen. Neben dem Einsatz beim Trocknen können Materialien aushärten. Das Backen in seinen gesamten Formen von Lebensmitteln bis zu technischen Prozessen findet mit Thermostrahlung statt.

Kunststoffe werden erweicht und verformt. Mit Infrarotlasern werden Kunststoffe verschweißt, beschriftet und geschnitten, im Einsatz sind Diodenlaser, Nd:YAG-Laser und Kohlendioxidlaser. Hier erfolgt die Auswahl der Laser nach der Absorption der jeweiligen Kunststoffe, Kohlendioxidlaser senden bei $10,6\text{ }\mu\text{m}$, der Nd:YAG-Laser bei 1064 nm .

Auch Metalle werden mit Infrarotlasern gebohrt, geschnitten, gehärtet und graviert.

Warenbahnen werden mit Infrarotstrahler getrocknet, die mit Gas oder elektrisch beheizt sind. Solche Zusatzeinrichtungen sind an Papiermaschinen vorhanden.

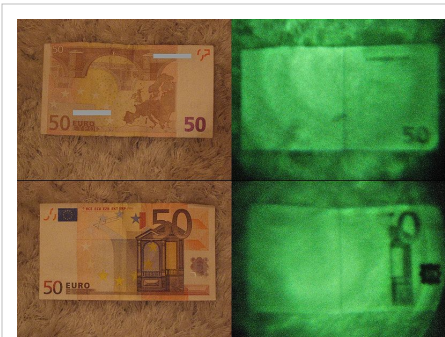
Druckmaschinen werden bei problematischen Bedruckstoffen mit Infrarot-Wärmestrahler versehen.

Sicherheitsdokumente

Sicherheitsmerkmale in Pässen und Geldscheinen werden ebenfalls mit Infrarotstrahlern überprüft. So kann bei Euroscheinen neben anderen Merkmalen die Infrarotabsorption bestimmter Materialien bei definierten Wellenlängen geprüft werden. Auch die Infrarotfluoreszenz von Methylenblau im britischen Reisepass ist solch ein Merkmal.

Weblinks

- *Was ist Infrarotstrahlung* ^[4]. Deutsches SOFIA Institut – Universität Stuttgart, 16. Jul. 2008, abgerufen am 29. März 2009.



Links unter normalem Licht, rechts unter Infrarot-Licht fotografiert

Siehe auch

- Nondispersiver Infrarotsensor

Einzelnachweise

- [1] Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Benennung der Wellenlängenbereiche*. In: *DIN*. 5031 Teil 7, 1984-01.
- [2] *AT-Mega Projekt : Mit der Infrarotkamera den Hotspots auf der Spur* (<http://www.cczwei.de/index.php?id=tvissuearchive&tvissueid=34#a85>). In: *ComputerClub*?, 18. September 2008, abgerufen am 16. Dezember 2009 (Beitrag in einer TV-Sendung; Folge 23).
- [3] Bayerischer Rundfunk (Hrsg.): *Rettungsaktion: Polizeihubschrauber im Einsatz* (<http://www.br-online.de/bayern2/nahaufnahme/bergsport-bergwacht-polizeihubschrauber-ID1236005451667.xml>). abgerufen am 13. März 2009 (Video-Beispiel)
- [4] http://www.dsi.uni-stuttgart.de/bildungsprogramm/ir-strahlung/was_ist_ir.html

Komplementärfarbe

Komplementärfarbe (lat. *complementum*: Ergänzung) ist ein Begriff aus der Farbenlehre. Sowohl bei der additiven Farbmischung als auch bei der subtraktiven Farbmischung nennt man diejenige Farbe komplementär, die mit der Ursprungsfarbe gemischt einen (neutralen) Grauton ergibt. Ein Farbenpaar kann gerade farbenpsychologisch als komplementär empfunden werden, auch wenn es dies technisch-physikalisch (etwa in RGB-Werten) nicht ist.

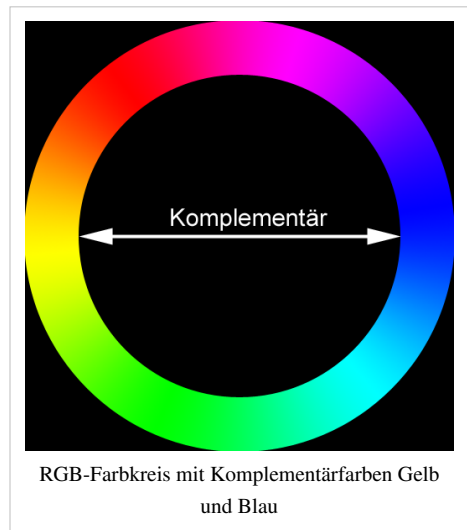
Komplementärfarbe und Farbmodell

Die konkrete Zuordnung Farbe zur Komplementärfarbe hängt vom gewählten Farbmodell ab. Beispielsweise werden folgende Paare von Komplementärfarben gesetzt

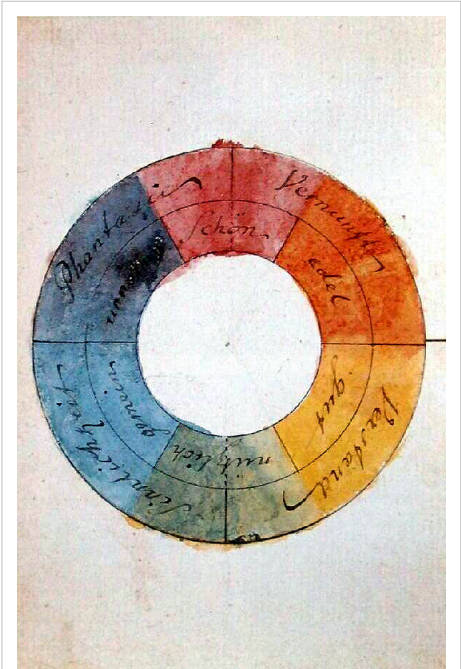
- Blau ↔ Gelb, Rot ↔ Cyan und Grün ↔ Magenta im Modell nach Helmholtz, diesen Farbnamen folgen das CIE-System und die meisten technischen Systeme wie RGB oder CMY.
- Blau ↔ Gelb und Rot ↔ Grün im Prozess-Modell nach Hering, auf dem der Lab, das Munsell und das NCS-System aufbauen.
- Blau ↔ Orange, Rot ↔ Grün und Gelb ↔ Violett sind komplementär im Modell nach Goethe und dem Farbmodell nach Itten, das für künstlerische Zwecke genutzt wird.

Wird das Farbmodell als Farbkreis dargestellt, so stehen sich Komplementärfarben (in diesem Farbmodell) stets genau gegenüber. Deshalb werden sie auch gelegentlich als *Gegenfarben* bezeichnet. Heute verwendet man den Ausdruck speziell für die Kontraste der Hering'schen Gegenfarbentheorie.

Da sich die Farbe mit ihrer Komplementärfarbe „aufheben“ soll, ist also ein Punkt auf der Grauachse anzustreben. Für das CIELAB-Farbmodell ergibt sich somit zur Farbe {L, a, b} die Komplementärfarbe mit den Koordinaten {L, -a, -b}, weil die



Spiegelungsachse dann mit $a=b=0$ die Grauachse ist. Eine entsprechende Rechengvorschrift für einen HLC-Farbwert erfordert mithin $C_{\text{summiert}} = 0$, oder zu C_{Farbe} gehört der negative Wert $-C_{\text{komplementär}}$.



Farbenkreis von Goethe, 1809

Komplementärfarben nach RGB/CMY

In der folgenden Tabelle wird die Rechengvorschrift an den Grundfarben der RGB/CMY-Farbmischung verdeutlicht. Für die Werte R, G, B oder Y, M, C ergibt sich die entsprechende komplementäre Farbe durch ergänzen zu 100%, in 8bit zu FF, in 4bit zu F. Die Spiegelungsachse für Komplementärfarben ist das Neutralgrau, mit dem dezimalen Wert {0,5;0,5;0,5} oder in 8bit als (#888888), entsprechend in 4bit mit (888). Am Beispiel wird es deutlich: zur Webfarbe #3378F9 ist #CC8706 komplementär, zu #99AA77 ist es #665588. Die Zahlenpaare hexadezimal addiert ergeben FFFFFFFF.

Farbe	Komplementärfarbe	Wiedergabe in Monitor-RGB	
Rot	Cyan	<div></div>	<div></div>
Grün	Magenta	<div></div>	<div></div>
Blau	Yellow (=Gelb)	<div></div>	<div></div>
Komplementärbeispiel 1		#3378F9	#CC8706
Komplementärbeispiel 2		#99AA77	#665588
Komplementärfarbe	Farbe	komplementäre Benennung	

Ursachen

Physiologisch betrachtet gibt es mindestens zwei Arten, die Komplementärfarbe zu definieren:

- durch den Sukzessivkontrast
- durch den Simultankontrast

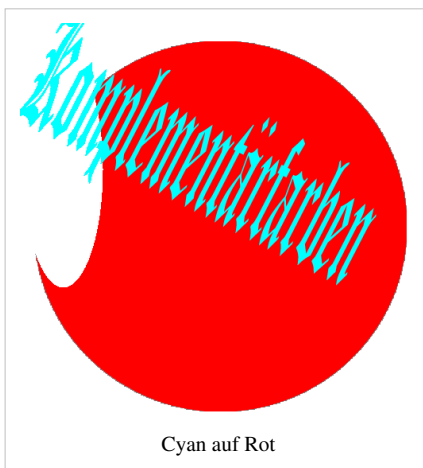
Beide Kontraste zeichnen sich dadurch aus, dass das Auge bei intensivem Betrachten einer Farbfläche eine andere (evtl. gar nicht vorhandene) Farbe erzeugt. Johannes Itten behauptet, dass diese beiden Kontraste wesensgleich sind.

Wirkung

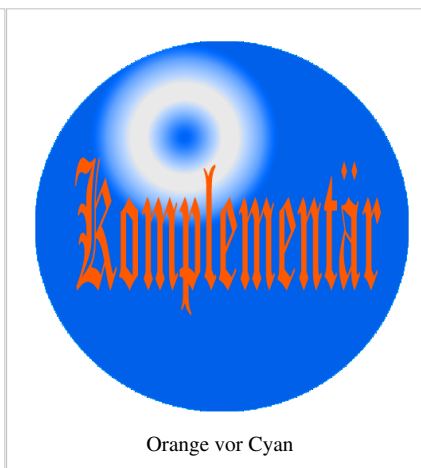
- Komplementärfarben sind verantwortlich für den Komplementärkontrast und eine darauf aufbauende Klasse von optischen Täuschungen.
- Da Farbkontraste im Sehorgan überhöht werden, werden Komplementärfarben auch gerne in der Werbung genutzt: Fleisch vor grünem oder Salat vor rötlichem Hintergrund sieht frischer aus.
- Eine weitere Anwendung des Komplementärfarbenprinzips findet man bei Waschmitteln, deren blaue Zusätze älterer weißer Wäsche ihren Gelbstich nehmen.
- Wird eine Struktur mit verschiedenfarbigen Lichtquellen bestrahlt so entstehen farbige Schatten. Im Falle der Abbildung wiederum eine Lichtquelle farbig (im Bild: blau) und die andere neutralweißes Licht abstrahlt so entstehen (eine weiße Fläche vorausgesetzt) Schatten in komplementärer Farbe (im Bild: gelb).
- Wenn Komplementärfarben auf einer Oberfläche gegeneinander benutzt werden, beispielsweise oranger Text auf blauem Grund, wird der Sehsinn (also die Farbrezeptoren, wie auch die nachgeschalteten Nervenzentren) überreizt, was meistens als unangenehm empfunden wird. Insbesondere ergibt sich an den Kanten ein Flimmern, der Hard-Edge-Kontrast.



Komplementärfarbige Schatten



Cyan auf Rot



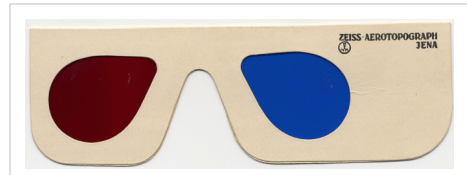
Orange vor Cyan



Hellgelb auf Dunkelblau

Anwendungen

Komplementärfarben sind in der Lage sich gegenseitig auszulöschen oder zu verstärken. Beim Anaglyphenverfahren wird ein Rauntiefeneffekt erreicht, indem dem linken und dem rechten Auge unterschiedliche Bilder angeboten werden. Werden die beiden Teilbilder in verschiedenen Farben gedruckt und anschließend durch eine Farbbrille in Komplementärfarben betrachtet so entsteht der beabsichtigte räumliche Eindruck. Durch unterschiedliche Farbfilter wird jedem Auge getrennt das jeweilige Bild zugeführt. Üblicherweise im Komplementärpaar Rot-Grün gedruckt, wird das grüne Teilbild durch das grüne Brillenfilter als weiß, also in der Papierfarbe, durchgelassen und dort nicht wahrgenommen. Das rote Teilbild wird durch das grüne Brillenfilter allerdings gesperrt und wegen des so erzeugten Kontrastes zum Papier als Schwarz wahrgenommen. Da das rote Filter dem anderen Auge nach der gleichen Steuerung das andere Teilbild vermittelt, sieht man beide anaglyphen Teilbilder wieder getrennt und gewinnt einen räumlichen Eindruck. Abhängig vom nutzbaren Druckfarben- und Brillenfarbpaar sind auch andere Komplementärpaare im Einsatz, im patentierten „Deep Vision“-System Cyan mit Rot und von der dänischen Firma „Color Code“ Brillen mit Blau vor dem rechten Auge und Gelb vor dem linken.



Rot-Blau-Brille



3D-Brille mit Rot-Grün

Siehe auch

- Grundfarbe
- Invertieren
- Nachbild
- Negativ

Literatur

- Harald Küppers: *Schnellkurs Farbenlehre*. DuMont, Köln 2006. Taschenbuch.

Weblinks

- Küppers' Farbenlehre ^[10]
- Komplementärfarben-Berechnung im RGB-Raum mit Aufhellungen und Abdunklungen (en:) ^[1]

Referenzen

- [1] <http://design.geckotribe.com/colorwheel/>

Kontrast (Optik)

Kontrast (lat. *contra* „gegen“ und *stare* „stehen“) bezeichnet den Unterschied zwischen hellen und dunklen Bereichen eines Bildes (es unterscheidet helle und dunkle Farben). Umgangssprachlich wird auch von Brillanz gesprochen, die aber im Unterschied dazu technisch nicht definiert ist.

Definition

Der *Kontrast* ist ein Unterscheidungsmerkmal für den Helligkeitsverlauf eines Bildes, oder zwischen zwei Bildpunkten. Der *Kontrastumfang* oder die Dynamik beschreiben den Intensitätsunterschied zwischen dem hellsten und dunkelsten Punkt eines Bildes. Im allgemeinen Fall wird der Kontrast in Abhängigkeit von der Auflösung über die Modulationsübertragungsfunktion beschrieben.

Der Weber-Kontrast K_w (min. 0, max. ∞) wird definiert als:

$$K_w = \frac{L_{max}}{L_{min}} - 1$$

Der Michelson-Kontrast K_m (min. 0, max. 1) wird definiert als:

$$K_m = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$$

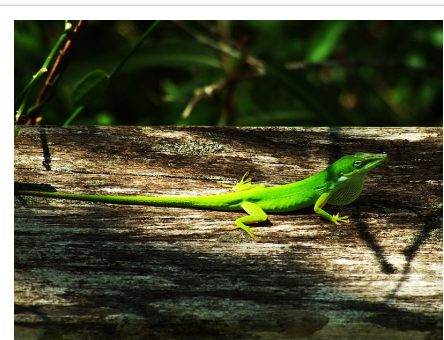
Dabei bezeichnet L die Leuchtdichte.

Während das menschliche Auge den in der Natur auftretenden Kontrastumfang relativ problemlos meistert (die Intensitäten werden nicht linear, sondern logarithmisch wahrgenommen), stoßen wir bei dem Bemühen, das Gesehene festzuhalten, an teilweise ernüchternde Grenzen.

Bilddarstellung

In der Analogfotografie entscheidet das Filmmaterial über den Kontrastumfang. Bei der Digitalfotografie ist es die Leistung des Analog-Digitalwandlers. Neuere Digitalkameras versuchen den Dynamikumfang durch ein nichtlineares Ansprechverhalten (ähnlich dem menschlichen Auge) zu erweitern. Ein wichtiger Einflussfaktor auf den Kontrastumfang ist auch die gewählte ISO-Empfindlichkeit: höhere ISO-Empfindlichkeiten führen in der Regel zu einem höheren darstellbaren Kontrastumfang. Fotografische Blende und Belichtungszeit verschieben lediglich den Bereich, vergrößern aber nicht den Umfang.

Ein hoher darstellbarer Kontrastumfang bewirkt, dass helle Bildteile heller, dunkle wiederum dunkler als im abgebildeten Motiv wiedergegeben werden. Das Bild erscheint so für den Betrachter kontrastreich (also das Gegenteil von „flau“), verfügt aber in diesem Fall über weniger dargestellte Details, d.h. in dunklen (Schatten) sowie in hellen Bereichen (Lichtern) ist keine Zeichnung (Tonwertabstufung) mehr sichtbar. Ist es bei einem sehr kontrastreichen Motiv nicht möglich, den gesamten Tonwertumfang abzubilden, ist es oft günstiger, eher sehr knapp zu belichten, da *ausgefressene* Lichter kaum restauriert werden können, während zu dunkel geratene Bildpartien



Kontrast verstärkt, Bild wirkt silhouettenartig



Kontrastreiches Bild (Original)

durch entsprechende Nachbearbeitung meistens noch gerettet werden können.

Bei der digitalen Nachbearbeitung von Bildern ist ein hoher Kontrastumfang jedoch in jedem Fall besser, da der Kontrast nachträglich in weiten Grenzen erhöht, aber nur sehr eingeschränkt wieder reduziert werden kann. Eine ausführliche Beschreibung findet sich hier.

Eine Möglichkeit zur Kontrastbeeinflussung von Digitalfotos bietet die Aufnahme von Belichtungsreihen in Verbindung mit der Bildbearbeitung durch HDR-Software.

Bei der Bewertung von Objektiven spielt der Kontrast eine entscheidende Rolle. Die Modulationsübertragungsfunktion beschreibt den Verlauf des Kontrasts, der mit steigender Ortsfrequenz abnimmt und dadurch auch die Auflösung begrenzt.

Aus der Malerei sind die Techniken der sogenannten Sieben Farbkontraste bekannt, um kontrastreiche Bilder zu gestalten.



Geringer Kontrast (Kontrast künstlich reduziert, Bild wirkt flau)

Siehe auch

- Motivkontrast
- Beleuchtungskontrast
- Objektkontrast
- Aufsteilen
- Kontrastumfang
- Kontrastdifferenzierung
- Kontrastverhältnis
- Kontrast in der Schärfedarstellung
- High Dynamic Range
- Modulationsübertragungsfunktion

Weblinks

- Modulationsübertragungsfunktion ^[1]

Referenzen

[1] <http://www.foto-net.de/net/objektive/test.html>

Körperfarbe

Körperfarbe, auch **Gegenstandsfarbe** ist der Farbreiz, der von Objekten (feste, flüssige, gasförmige) ausgeht, die Umgebungslicht reflektieren.

Physikalische Beschreibung

Körperfarben ändern die spektrale Zusammensetzung entsprechend ihres Transmissions- und Remissionsverhaltens. Aus praktischen Gründen unterscheidet man Durchsichtsfarben (farbige Lösungen, Farbfilter) von Aufsichtsfarben (Anstrich, Textilfärbung). Erstere werden durch den spektralen Transmissionsgrad τ_λ , die anderen durch den spektralen Remissionsgrad β_λ beschrieben.

Der Farbeindruck, der durch Reflexion des Umgebungslichtes entsteht, beruht dabei auf zwei Eigenschaften des Körpers. Einerseits der Absorption des Lichts durch die spezifischen Elektronenkonfigurationen und andererseits der Lichtstreuung, die auf Grund der Oberflächeneigenschaften des Körpers entsteht. Dabei wird die Streuung sowohl durch makroskopische Teilchen als auch durch quantenmechanische Effekte hervorgerufen.

Der farbmetrische Ansatz für die wertmäßige Beschreibung der Körperfarbe also zwischen Substrat, Färbestoff und Körperoberfläche stammt von Kubelka und Munk (siehe Kubelka-Munk-Theorie). Damit wird ein Zusammenhang zwischen dem konzentrationsabhängigen Absorptionskoeffizienten K , einem stoffspezifischen Streukoeffizienten S und dem Remissionsgrad $\beta(\lambda)$ hergestellt. Beachtenswert ist hierbei, dass diese Beziehung jeweils nur für die ausgewählte Wellenlänge gilt. In differentiellen Schichten nahe der Oberfläche werden differentielle Anteile des auftreffenden Lichtes gestreut und vom absorbierten Licht wird jeweils an der nächsten Schicht wiederum ein Anteil gestreut. Die Körpereigenschaft wird in Abhängigkeit von der Wellenlänge als Remissionsgrad $\beta(\lambda)$ spektral angegeben. Die Wahrnehmung wird allerdings von der herrschenden Beleuchtung (Lichtart, Weißpunkt) beeinflusst, die ebenfalls als Spektrum $S(\lambda)$ in die Wirkung eingeht.

Durch die Pigmentierung, die Einfärbung (oder Streueffekte) der Oberfläche von Körpern wird das auftreffende Licht in seiner spektralen Zusammensetzung verändert. Der Grund ist die mit den Oberflächen verbundene Absorption und Streuung. Bei transparenten Oberflächen wirken die tieferliegenden Schichten.

Abgrenzung zum Begriff Farbe

Per Definition ist Farbe nur jene visuelle Qualität, die von Struktur und Umgebungsbedingungen unabhängig ist.^[1] Die Transparenzfarbe (Durchsichtsfarbe), die von durchsichtigen oder durchscheinenden Körpern ausgehend wahrgenommen wird, kann unter gewissen Bedingungen als Lichtfarbe wirken. Für die spektrale Zusammensetzung wird hierbei der Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ benutzt. Bei fehlender Streuung kann dieses Spektrum nach Lambert und Beer zur Konzentrationsbestimmung genutzt werden.

Farbmischung

Auf Körperfarben lässt sich die subtraktive Farbmischung anwenden. Die eigentliche visuelle Qualität (die Lichtfarbe) folgt nach Reflexion und Streuung der additiven Farbmischung.

Siehe auch

- Lokalfarbe

Literatur

- Harald Küppers: *DuMont Farbenatlas*. Über 5500 Farbnuancen mit digitalen Farbwerten, Kennzeichnung und Mischanleitung. 10. Auflage. DuMont Literatur und Kunst Verlag, Köln 2007, ISBN 978-3832190194.

Einzelnachweise

- [1] DIN 5033: „Farbe diejenige Gesichtsempfindung eines dem Auge des Menschen strukturlos erscheinenden Teiles des Gesichtsfeldes, durch die sich dieser Teil bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge von einem gleichzeitig gesehenen, ebenfalls strukturlosen angrenzenden Bezirk allein unterscheiden kann“

Lab-Farbraum

<u>DIN</u>	DIN 6174
Bereich	Farbmetrik
Titel	Farbmetrische Bestimmung von Farbmaßzahlen und Farbabständen im angenähert gleichförmigen CIELAB-Farbenraum
Kurzbeschreibung:	CIELAB-Farbraum
Letzte Ausgabe	10.2007
ISO	-

Der **L*a*b*-Farbraum** ist ein Messraum, in dem alle wahrnehmbaren Farben enthalten sind. Der Farbraum ist auf Grundlage der Gegenfarbentheorie konstruiert. Eine der wichtigsten Eigenschaften des L*a*b*-Farbmodells ist seine Geräteunabhängigkeit, das heißt, die Farben werden unabhängig von der Art ihrer Erzeugung und Wiedergabetechnik definiert. Die entsprechende deutsche Norm ist *DIN 6174*: „Farbmetrische Bestimmung von Farbmaßzahlen und Farbabständen im angenähert gleichförmigen CIELAB-Farbenraum“.^[1]

Einführung

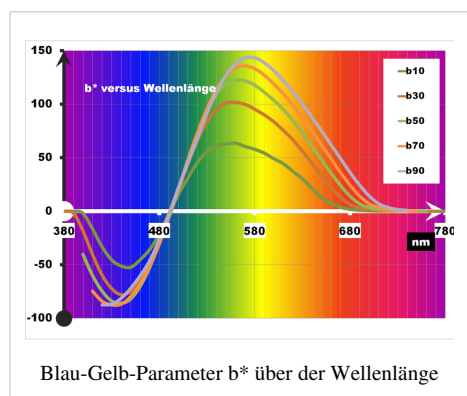
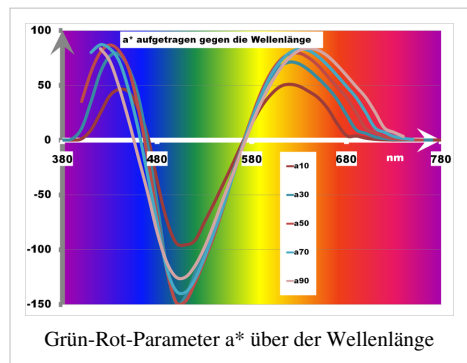
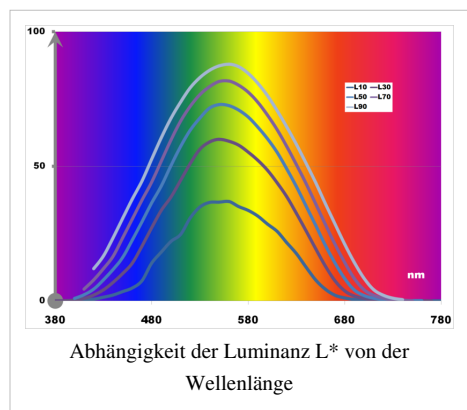
Das L*a*b*-Farbsystem wurde 1976 von der CIE aus dem CIE-XYZ-Modell entwickelt, um die empfindungsgemäße Farbcharakterisierung besser darstellen zu können als im Tristimulusmodell der CIE von 1931.

In diesem Farbmodell sollen gleiche euklidischen Abstände empfindungsgemäß gleichen Farbabständen entsprechen, was näherungsweise auch gelingt. Dies wurde durch eine logarithmische Umformung der xy-Farbart-Ebene des CIE-XYZ-Modells erreicht.

Der so standardisierte Farbraum ist gleichabständig und geräteunabhängig. Jede wahrnehmbare Farbe im Farbraum ist durch den Farbart mit den Koordinaten $\{L^*, a^*, b^*\}$ definiert. In Anwendung der Gegenfarbentheorie liegen sich hier Grün und Rot auf der a^* -Achse gegenüber. Die b^* -Achse entspricht den Gegenfarben Blau und Gelb.

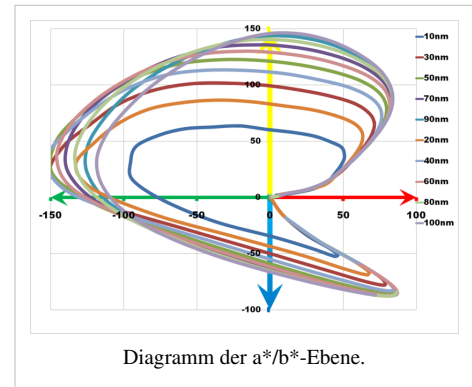
Die L^* -Achse steht auf dieser Ebene senkrecht und gibt die Helligkeit wieder. Die L^* -Achse kann auch als Neutralgrauachse bezeichnet werden, da sie die Endpunkte Schwarz ($L=0$) und Weiß ($L=100$) besitzt und die Zwischenwerte auf dieser Achse die unbunten Grautöne sind.

Für diese Parameter wurden die Lab-Farbwerte des Hunter-Lab-Systems weiterentwickelt. In Analogie zur xy-Farbart-Ebene lässt sich ein a^*/b^* -Diagramm errechnen. Am



Koordinatenursprung beginnend, verlaufen die Kurven mit zunehmender Wellenlänge bei Schwarz beginnend durch den Blau-Grün-Quadranten, um dann schließlich wieder bei Schwarz zu enden.

Auf Basis dieses Farbraumes hat die CIE die Farbabstandsformel 1994 und 2000 entsprechend Erfordernissen der Praxis angepasst, wobei auch Materialfaktoren zugefügt wurden. Auch die Abstandsformeln der CMC (Color Measurement Committee) benutzen die Lab-Koordinaten. Eine Forderung zur Weiterentwicklung des CIE-Farbmodells von 1931 bestand darin, dass bei Toleranzen die vereinbarten Differenzen nicht vom Messwert, hier dem Farbort, abhängen sollen.



Koordinatensystem

Der $L^*a^*b^*$ -Farbraum wird durch ein dreidimensionales Koordinatensystem beschrieben. Die a^* -Achse beschreibt den Grün- oder Rotanteil einer Farbe, wobei negative Werte für Grün und positive Werte für Rot stehen. Die b^* -Achse beschreibt den Blau- oder Gelbanteil einer Farbe, wobei negative Werte für Blau und positive Werte für Gelb stehen. Die Skalen der a^* -Achse und der b^* -Achse umfassen einen Zahlenbereich von -150 bis +100 und -100 bis +150, ungeachtet dessen, dass es für einige Werte keine wahrnehmbare Entsprechung gibt. Da die Farbwahrnehmung bei der Erstellung dieses Farbraumes berücksichtigt wurde, ist der daraus resultierende Farbkörper bei kartesischen Koordinaten ungleichförmig. Die L^* -Achse beschreibt die Helligkeit (Luminanz) der Farbe mit Werten von 0 bis 100.

Im Vergleich zum ursprünglichen XYZ-Raum der CIE-Normfarbtafel ist im a^*b^* -System der Grünbereich kleiner, während der Purpur-Blau-Cyanbereich größer ist.^[2]

Einen ungefähren Eindruck davon soll die Kurvenschar im a^*b^* -Diagramm geben. Während Gelb und Grün Werte bis zu 150 erreichen können, belegen Rot und Blau Zahlenwerte nur bis 100.^[3] Grundlage des dargestellten Diagrammes sind idealisierte Rechteckspektren mit Spaltbreiten von 10 nm bis 100 nm und einer Remission von 100%, die in Tristimuluswerte berechnet und in den $L^*a^*b^*$ -Farbraum transformiert wurden. Entsprechend dieser Ermittlung liegen maximale Angaben vor.

Bedeutung

Die Koordinaten des $L^*a^*b^*$ -Farbortes orientieren sich an den physiologischen Eigenschaften der menschlichen Wahrnehmung (*Farbwahrnehmung*), sie basieren nur mittelbar auf physikalischen Farbvalenzen (*Farbmetrik*).

Der wesentliche Vorteil ist die visuelle Gleichabständigkeit: die geometrisch berechenbaren Abstände zweier Farborte im Lab-System entsprechen gut angenähert visuell wahrgenommenen Farbabständen. Hierbei waren die Arbeiten von MacAdam grundlegend: lässt man Versuchspersonen (im historischen Versuch waren es nur MacAdam und seine Mitarbeiter) verschiedene Farbrepräsentationen des xy -Systems auf ihren subjektiven Abstand beurteilen, so sind die Toleranzbereiche keine farbortunabhängigen Kreise, sondern MacAdam-Ellipsen, deren Größe und Richtung von der Versuchsgröße und dem jeweiligen zentralen Farbort abhängen. Da die Farbdifferenzen im $L^*a^*b^*$ -System immer noch nicht perfekt wiedergegeben werden, wurden im Laufe der Jahre von der CIE immer weiter verbesserte Farbdifferenzformeln entwickelt, die eben diese vom Farbort und den Betrachtungsbedingungen abhängigen Abweichungen besser berücksichtigen.

Anwendung des L*a*b*-Farbkörpers

Der umfassende L*a*b*-Farbraum enthält, wie auch XYZ, alle potentiellen Farben, geräteunabhängig, und erlaubt so die verlustfreie Konvertierung von Farbinformationen aus einem Farbsystem in ein anderes, von einer Geräteart in eine andere.

- Fotobearbeitungssoftware, wie Adobe Photoshop und SilverFast) verwenden zur Umrechnung L*a*b* als Referenzfarbsystem. Aus dem Geräte-RGB oder einem vorgeordneten RGB (s-RGB, Adobe-RGB) lassen sich Bilder vom RGB-Farbraum des Monitors in das zum Ausdrucken benötigte CMYK-System umwandeln^{[4] [5] [6]}.
- L*a*b*-Koordinaten werden als Austauschformat zwischen unterschiedlichen Geräten eingesetzt.
- L*a*b* ist das interne Farbmodell von PostScript Level II.
- Das RAL-Design-System benutzt den Lab-Formalismus, der von der DIN 6174 verbindlich vorgeschrieben ist.

XYZ und RGB

Das farbige Feld umfasst alle mit dem *gemittelten* menschlichen Auge sichtbaren Farben des CIE-Normvalenzsystems. Anschaulich wird der dreidimensionale Raum unter Einschluss der Helligkeit im Farbkörper nach Rösch aus dem Jahre 1928 dargestellt. Mit diesem sogenannten „Farbberg“ und weiteren Untersuchungen lieferte er grundlegende wissenschaftliche Überlegungen zur Erstellung des XYZ-Farbsystems. In der Fläche lassen sich nur zwei Dimensionen darstellen, diese Farbarten-Ebene (xy-Diagramm) ist hier dargestellt. Alle technisch realisierbaren Farbzeuge, sowohl Lichtfarben als auch Körperfarben, liegen innerhalb der parabelartigen Farbfläche. Diese Fläche wird wegen der Form auch „Schuhsohle“ genannt, im Englischen wird diese als „horseshoe“ (Hufeisen) bezeichnet.

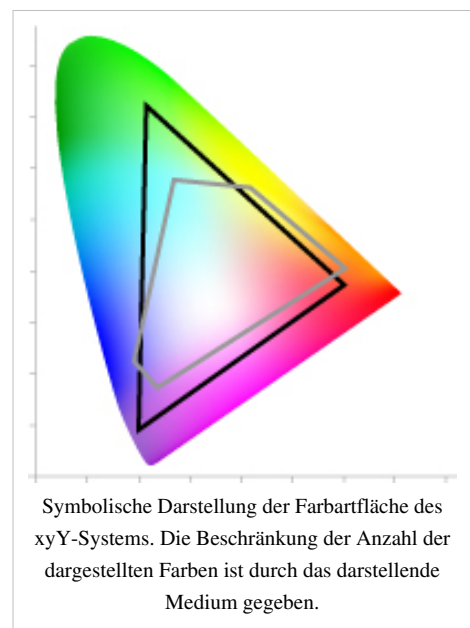
Mit technischen Geräten (Computermonitor) lassen sich nicht alle diese Farben darstellen, jene Emissionsquellen entsprechen auf Grund der Erzeugung (Rot-Grün-Blau) den RGB-Farbräumen. Es gibt mehrere RGB-Farbräume, da wegen unterschiedlicher Herstellung oder eingesetzter Phosphore geräteabhängige Unterschiede bestehen.^[7] (Anmerkung: Der äußere Bereich des Feldes ist gesättigter, als er auf dem Bildschirm dargestellt werden kann. Dieser eingeschränkte Gerätefarbraum heißt Gamut).

- Die graue Linie umfasst den CMYK-Farbraum,
- die schwarze einen RGB-Farbraum in Form des sRGB (Monitor-RGB).

Der XYZ-Farbraum ist als ältester **Norm**farbraum nicht perzeptiv. Der zahlenmäßig gleiche Farbabstand zwischen zwei Punkten mit gleicher Entfernung vom Weißpunkt wird in verschiedenen Bereichen der Farbtabelle nicht als gleich wahrgenommen. Es kann die Farbe auf Basis der Vektordaten wieder erreicht werden, aber für eine Toleranzbildung, wie sie für Längen bekannt ist, ist dieser Farbraum ungeeignet, das Abstandsmaß ist vom Buntton abhängig.

In RGB-Farbräumen ist das gewünschte Abstandsmaß durch die elektrischen oder lichttechnischen Stellgrößen vorgeschrieben und begrenzt.

Der L*a*b*-Raum besitzt nun den Vorteil den beschriebenen Nachteil zu überwinden und dennoch enthält er alle RGB-Farbräume. Die entsprechenden Transformationen sind dabei durch mathematische Operationen genau definiert.



Umrechnung von XYZ zu Lab

Rotwert X und Blauwert Z werden auf die Beleuchtungsart zentriert. Die Normierungswerte ergeben sich aus dem Farbort des Weißpunktes eines schwarzen (Planckschen) Strahlers im XYZ-Farbraum, der zur gewählten Beleuchtungsart gehört.

Damit sind X_n und Z_n festgelegt, der Grün-(und Hellbezugs-)wert Y wird wegen seiner Eigenschaft mit $Y_n = 1$ vordefiniert (sobald es um Lichtquellen geht) und deshalb wird Y direkt eingesetzt. Die unnormierten Werte X_n , Z_n und Y_n der Bezugslichtart dürfen dabei nicht mit den durch die Summe der drei Farbwerte normierten Größen (x;y;z) verwechselt werden.

Zum Beispiel sind für eine Lichtquelle mit ca. 6500K Temperatur die normierten Bezugsgrößen $x=0.31$, $y=0.33$ und $z=1-x-y$, die unnormierten Werte sind jedoch $X_n=x/y=0.95$, $Y_n=1$ und $Z_n=z/y=1.09$. Manchmal werden die XYZ Werte auch auf den Bereich 0..100 skaliert, dann sind entsprechend $X_n=95$, $Y_n=100$ und $Z_n=109$.

Im amerikanischen Raum wird bevorzugt D50 = 5000K gewählt (direkte Sonnenstrahlung), in Europa üblicherweise nach EN-Norm die Normlichtart D65 = 6500K (bedeckter Himmel bei Abmusterung am Nordfenster).

- Helligkeit: $L^* = 116 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16$
- Grün-Rot: $a^* = 500 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \right)$
- Gelb-Blau: $b^* = 200 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}} \right)$
- Für kleine Werte (dabei steht P je für X,Y,Z) mit $\frac{P}{P_n} < \frac{216}{24389}$ wird die dritte Wurzel durch die folgende Beziehung ersetzt:

$$\frac{1}{116} \cdot \left(\frac{24389}{27} \cdot \frac{P}{P_n} + 16 \right)$$

Die Faktoren 500 resp. 200 sollen die resultierenden Werte für a^* und b^* in die gewohnten Größenordnungen bringen, die auch zum maximalen L^* von 100 passen.

Umrechnung von Lab zu LCh

Der LCh-Farbraum – mit den Koordinaten (L^* , C^* , h°) – entspricht dem Lab-Farbraum, wird jedoch in Polarkoordinaten (genauer in Zylinderkoordinaten) angegeben. Der Vorteil ist die Umsetzung der Buntheit in einen kontinuierlichen Kreis von Farben von Rot nach Rot.

Aus $L^*a^*b^*$ lassen sich Buntheit und Farbton berechnen:

- Buntheit: $C_{ab}^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$
- Farbton: $h_{ab}^\circ = \arctan \frac{b^*}{a^*}$
- Helligkeit: $L_{Lab}^* = L_{LCh}^*$

Umrechnung von RGB zu Lab

Im Gegensatz zu den RGB-Koordinaten wird bei der Farbort-Angabe in $L^*a^*b^*$ -Koordinaten die Helligkeit von den Farbinformationen getrennt. Werden RGB-Bilder in der Helligkeit verändert, so ändern sich auch die einzelnen Komponenten, aus denen die Farbe besteht. Bei $L^*a^*b^*$ -Bildern bleiben die Farbinformationen im a^* - und b^* -Kanal unberührt. Der $L^*a^*b^*$ -Farbraum hat einen größeren Farbumfang als die über die Geräteeigenschaften definierten Räume mit RGB- oder CMYK-Koordinaten und umfasst deren jeweiligen Farbumfang vollständig.

Das L*a*b*-Farbsystem beschreibt alle wahrnehmbaren Farben. Mit technischen Geräten ist je nach Substraten und Geräteart nur ein Teil dieser Farben erfassbar. Somit wird im L*a*b*-Messraum Speicher für Farben freigehalten, die kein Scanner einlesen, kein Monitor darstellen und kein Drucker ausgeben kann^[8]. In der Praxis führt dies aber nicht zur Vergrößerung von Bilddateien.

Eine Transformation vom RGB-Farbraum in den L*a*b*-Farbraum wird jeweils über die XYZ-Koordinaten geführt. Die Umrechnungsformeln von RGB zu XYZ (Monitor-Rot R in X: virtuelles Rot, Monitor-Grün G in Y: virtuelles Grün, Monitor-Blau B in Z: virtuelles Blau) lauten (beispielhaft sei der sRGB vorgestellt):

$$X = 0.4124564 R + 0.3575761 G + 0.1804375 B$$

$$Y = 0.2126729 R + 0.7151522 G + 0.0721750 B$$

$$Z = 0.0193339 R + 0.1191920 G + 0.9503041 B$$

Farben, Farborte, Farbnamen

Farbe	L*	a*	b*
Weiß	100	0	0
Schwarz	0	0	0
Grau	50	0	0
Hellmagenta	100	+80	-80
Rot	50	+100	0
Dunkelrot/Braun	0	+100	0
Grün	0...100	-150	0
Blau	0...100	0	-90
Gelb	0...100	0	+150

Siehe auch

- CIE-Normvalenzsystem
- xyY-Farbraum
- YCC
- Farbraum (weitere Farbräume, Farbraumsysteme, Farbmodelle)
- Farbabstand
- DIN99-Farbraum

Literatur

- Manfred Richter: *Einführung in die Farbmatrik*. 1984 ISBN 3-11-008209-8

Weblinks

- Hauptseite der Division 1 der CIE^[9]
- Bruce Lindbloom^[10] unter dem Navi-Punkt „Math“ befinden sich die gebräuchlichen Umrechnungsformeln inkl. Matrizen^[11]
- Inhaltsverzeichnis der DIN 6174:2007-10 beim Beuth-Verlag^[12]

Einzelnachweise

- [1] Beuth-Verlag: DIN 6174: Farbmetrische Bestimmung von Farbmaßzahlen und Farbabständen im angenähert gleichförmigen CIELAB-Farbenraum (<http://www.beuth.de/langanzeige/DIN+6174/99604465.html>) (Ausgabe DIN 6174:2007-10; abgerufen am 15. Juli 2009)
- [2] Loos, H. 1988: Farbmessung - Grundlagen der Farbmetrik und ihre Anwendungsbereiche in der Druckindustrie - Band 4 der Reihe Naturkundliche Grundlagen der Druckindustrie. Verlag Beruf und Schule in Itzehoe: 104.
- [3] Binder, M. 2002: Der CIELab Farbenraum (DIN 7174). <http://www.binder-muc.de/cielab.htm>. 1. Januar 2004.
- [4] Adobe2000: Color And Color Management Technical Guides. Adobe Systems Incorporated; <http://www.adobe.com/support/techguides/color/colormodels/hsb.html>. 10. November 2003.
- [5] Schurr, U. 2000: Handbuch Digitale Bildverarbeitung - Vom Scannen bis zum Colormanagement - 1. Auflage. dpunkt.Verlag: 151.
- [6] Noack, W. 1998: Photoshop 6.0 - Grundlagen Bildbearbeitung - 1. Auflage. RRZN / Universität Hannover. RRZN-Klassifikationsschlüssel: GDV.ALL 13: 6-8.
- [7] eine umfangreiche Sammlung von Umrechnungskonstanten und -matrizen, Kalkulatoren und Beispielen (<http://www.bruceindbloom.com/>)
- [8] H. Wargalla: *Farbe geräteunabhängig: Eine Einführung in das Lab-Farbmodell*. In: 5. Dezember 2003 (<http://www.publisher.ch/heft/992/wargalla.pdf>)
- [9] <http://div1.cie.co.at>
- [10] <http://www.bruceindbloom.com/>
- [11] http://www.bruceindbloom.com/index.html?Eqn_RGB_XYZ_Matrix.html
- [12] <http://www.beuth.de/cmd%3Bjsessionid=081A89BC6AF0CC23635C4EAE70AFA4B9.2?workflowname=infoInstantdownload&customerid=&docname=9860601&orgdocname=&contextid=beuth&servicerefname=beuth&LoginName=&ixos=toc>

Laser

Laser ['leɪzə] (Akronym für engl. *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, dt. »Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung«) ist ein physikalischer Effekt, mit dem künstlich gerichtete Lichtstrahlen erzeugt werden können. Der Begriff *Laser* wird dabei nicht nur für den Verstärkungseffekt, sondern auch für die Strahlquelle verwendet.

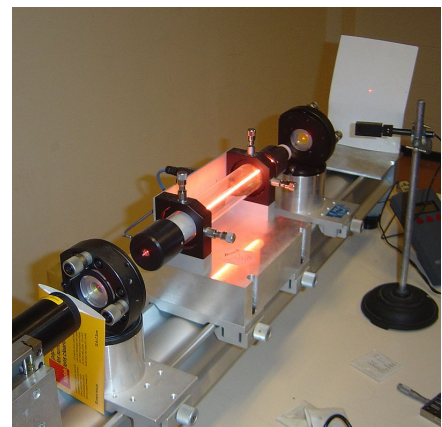
Geprägt wurde der Begriff Ende der 1950er Jahre^[1] durch Gordon Gould in Anlehnung an den Maser; Gould nutzte den Begriff erstmals 1957 in seinen Notizen.^[2] Frühe Veröffentlichungen nannten den Laser noch *optical maser* (optischer Maser).

Laserstrahlen haben Eigenschaften, die sie stark von Licht aus klassischen Lichtquellen (wie beispielsweise einer Glühlampe) unterscheiden. Hierzu gehören häufig:

- ein sehr enges Frequenzspektrum, d. h. das Licht hat nur eine Farbe, ist also monochromatisch,
- die Parallelität der Strahlung, die den Laserstrahl auch über große Entfernung kaum breiter werden lässt,
- und eine extrem große Kohärenzlänge.

Aufgrund dieser Eigenschaften gibt es zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten in Technik und Forschung und inzwischen auch im täglichen Leben. Die Anwendungen reichen von der einfachen Anzeige (z. B. Laserpointer bei Präsentationen) über Entfernungsmessgeräte, Schneid- und Schweißwerkzeug bis hin zum Laserskalpell und anderen Laser-unterstützten Methoden im medizinischen Alltag.

Die Gemeinsamkeit von Laserstrahlen liegt im Entstehungsprozess, nämlich in der stimulierten Emission.^[3] Sie stellt einen rückgekoppelten Verstärker für die Strahlung dar. Die Verstärkung wird in einem Medium wie einem



Demonstrationslaser: In der Mitte ist das Leuchten der Gasentladung zu sehen, die das Lasermedium anregt. Der Laserstrahl ist rechts als roter Punkt auf dem weißen Schirm zu erkennen.

Kristall, einem Gas oder einer Flüssigkeit erreicht, welchem durch optisches Pumpen oder andere Weise Energie zugeführt wird, meistens um eine Besetzungsinversion zu erreichen. Laser gibt es für Strahlungen in verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums: von Mikrowellen, über Infrarot, sichtbares Licht, Ultraviolett, bis hin zu Röntgenstrahlung.

Meistens wird das aktive Medium in einen Resonator eingebaut, um eine effektive Rückkopplung zu erzielen. Der Resonator beeinflusst die Eigenschaften des Laserstrahls wesentlich.

Pulslaser können auch so konstruiert werden, dass sie Impulse mit extrem geringer Dauer (Femtosekunden-Bereich) aussenden (vgl. Femtosekundenlaser). Die damit mögliche zeitaufgelöste Laserspektroskopie ist ein Standardverfahren zur Untersuchung schneller Prozesse geworden. Da Pulslaser oft nur wenige Lichtwellenzüge am Stück aussenden, haben sie prinzipbedingt eine sehr kurze Kohärenzlänge und ein breites Frequenzspektrum. Das Gegenstück zum Pulslaser ist der Dauerstrich-Laser.

Geschichte

Albert Einstein beschrieb bereits 1916 die stimulierte Emission als Umkehrung der Absorption. 1928 gelang Rudolf Ladenburg der experimentelle Nachweis. Danach wurde lange gerätselt, ob der Effekt zur Verstärkung des Lichtfeldes benutzt werden könnte, da zum Erreichen der Verstärkung eine Besetzungsinversion eintreten musste. Diese ist aber in einem stabilen Zweiniveausystem unmöglich. Zunächst wurde ein Dreiniveausystem in Betracht gezogen, und die Rechnungen ergaben eine Stabilität für Strahlung im Mikrowellenbereich, 1954 realisiert im Maser von Charles H. Townes, der Mikrowellenstrahlung aussendet. Der erste Laser – ein Rubinlaser – wurde von Theodore Maiman am 16. Mai 1960 fertiggestellt.^{[4] [5]}

Die weitere Entwicklung führte dann zunächst zu Gaslasern (Stickstoff-, CO₂-Laser, He-Ne-Laser^[6]) und danach zu Farbstofflasern (das laseraktive Medium ist flüssig). Eine Weiterentwicklung von Kristalltechnologien ermöglichte eine sehr starke Erweiterung des spektralen Nutzbereiches. Durchstimmbare Laser zum Anfahren einer bestimmten Wellenlänge und breitbandige Laser wie z. B. der Titan-Saphir-Laser läuteten in den 1980er Jahren die Ära der Ultrakurzpulslaser mit Pulsdauern von Piko- und Femtosekunden ein.

In den späten 1980er Jahren ermöglichte die Halbleitertechnologie immer langlebigere, hocheffektive Halbleiter-Laserdioden, die mit kleiner Leistung in CD- und DVD-Laufwerken oder in Glasfaser-Datennetzen eingesetzt werden und inzwischen nach und nach als Pumpquellen mit Leistungen bis in den kW-Bereich die wenig effektive Lampenanregung von Festkörperlasern ersetzen.

In den 1990er Jahren wurden neue Pumpgeometrien für hohe Laserleistungen verwirklicht, wie der Scheiben- und der Faserlaser. Letztere fanden zur Jahrtausendwende aufgrund der Verfügbarkeit von neuen Fertigungstechniken und Leistungen bis 20 kW zunehmend Anwendungen bei der Materialbearbeitung, wo sie die bisher gebräuchlichen Typen (CO₂-Laser, lampengepumpte Nd:YAG-Laser) teilweise ersetzen können.

Zu Beginn des 21. Jahrhunderts wurden erstmals nichtlineare Effekte ausgenutzt, um Attosekundenpulse im Röntgenbereich zu erzeugen. Damit ließen sich zeitliche Abläufe im Inneren eines Atoms verfolgen. Zuletzt erreichten blaue und ultraviolette Laserdioden die Marktreife.

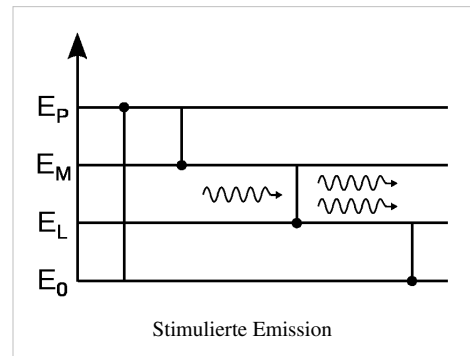
Inzwischen ist der Laser zu einem bedeutenden Instrument der Industrie, Kommunikation, Wissenschaft und Unterhaltungselektronik geworden.

Physikalische Grundlagen

Zusammenfassung

Für die Funktion des Lasers sind die drei grundlegenden Prozesse der Wechselwirkung von Licht mit Materie bestimmend: Absorption bzw. Anregung (Pumpen), spontane Emission und stimulierte Emission.

- Beim Pumpen des Lasers wird entweder ein Photon vom aktiven Medium (geeignete Materie, zum Beispiel Atome oder Moleküle in einem Festkörper, einer Flüssigkeit oder einem Gas) absorbiert, oder die Anregung erfolgt durch unelastische Stöße (Gasentladung, Teilchenstrahlung). Die Pumpleistung (Anregung) sorgt dafür, dass Elektronen der Atome oder Moleküle des aktiven Mediums in einen höheren Energiezustand, d. h. ein höheres Energieniveau gelangen.
- durch zunächst spontane Emission geht dieser angeregte Zustand spontan, das heißt zufällig und ohne äußere Einflüsse, wieder in einen niedrigeren Energiezustand über. Die Energiedifferenz wird in Form eines Photons abgestrahlt. Zeitpunkt der Aussendung und Richtung des Photons sind zufällig.
- Bei der stimulierten Emission wird durch ein solches, bereits existierendes Photon die Aussendung eines weiteren Photons angeregt; dieses besitzt die gleichen Eigenschaften (Frequenz, Phase, Polarisation und Ausbreitungsrichtung). Es ergibt sich eine Verstärkung der Strahlung. Ein Resonator oder die Gestalt des aktiven Mediums sorgen dafür, dass diese Verstärkung rückgekoppelt und in einer bevorzugten Richtung erfolgt.



Auch in geeigneten aktiven Medien werden die Photonen ohne Anregung (Pumpen) jedoch wieder absorbiert. Damit die Strahlung verstärkt wird, muss man dafür sorgen, dass der höhere Energiezustand E_M ständig oder zumindest kurzzeitig stärker besetzt ist als der untere E_L ; dann sind stimulierte Emissionen häufiger als Absorptionen. Da dies im thermischen Gleichgewicht nicht der Fall ist, spricht man von Besetzungsinversion. Um diese zu erreichen, kann man zum Beispiel Licht geeigneter Wellenlänge einstrahlen (Optisches Pumpen). Der nahe liegende Ansatz, Photonen der Energiedifferenz $E_M - E_L$ einzustrahlen, schlägt aber fehl, weil so auch direkt eine Emission stimuliert würde und die Wahrscheinlichkeiten von Emission und Absorption in einem Zweiniveausystem gleich sind. Stattdessen verwendet man zum Beispiel ein Medium mit einem Dreiniveausystem, bei dem zunächst auf ein drittes, höher gelegenes Energieniveau E_P gepumpt wird. Von dort erfolgt strahlungslos oder per spontaner Emission ein Übergang auf das Niveau E_M . Der Trick besteht nun darin, die Energieniveaus so zu wählen, dass ein spontaner Übergang von E_P zu E_M sehr viel schneller erfolgt (das heißt, sehr viel wahrscheinlicher ist), als ein Übergang von E_M auf E_L und der direkte Übergang von E_P nach E_L sehr unwahrscheinlich ist. In diesem Falle wird durch das Pumpen die Zahl der Teilchen im Zustand E_M stetig erhöht. Je nach aktivem Medium gibt es aber auch Zweiniveaulaser im kontinuierlichen Betrieb (zum Beispiel die elektrisch gepumpten Diodenlaser) und Vierniveaulaser, bei denen das Niveau E_L auf ein noch tieferes Niveau abgeregt werden muss, um erneut gepumpt werden zu können (z. B. Kohlendioxidlaser).

Beginn der Laseremission

In einer Materieansammlung (Gas, Festkörper, ...), die energetisch ausreichend angeregt ist, entstehen immer auch Photonen durch *spontane* Emission, die sich in irgend eine Richtung ausbreiten. Falls sie auf ihrem Weg zufälligerweise auf Atome im metastabilen Zustand treffen *und* die Energien zusammenpassen für eine *stimulierte* Emission, verstärkt sich die Intensität des Lichtes. Bei jedem energetisch „gemolkenen“ Atom kommt ein Photon zur bereits vorhandenen Menge dazu, die Lichtintensität steigt. Zum Glück kann auf dem weiteren Weg durch die Materieansammlung *kein* Photon durch Resonanzabsorption abhandenkommen, wie man beispielsweise beim Durchgang von Natriumlicht durch Natriumdampf oder bei Fraunhoferschen Linien beobachten kann. Ursache ist der verbotene Übergang: Wenn das Atom die im metastabilen Zustand gespeicherte Energie nicht so ohne weiteres

emittieren kann, kann es diese Energie auch nicht absorbieren, auch wenn sich das Elektron im unteren Zustand E_L befindet.

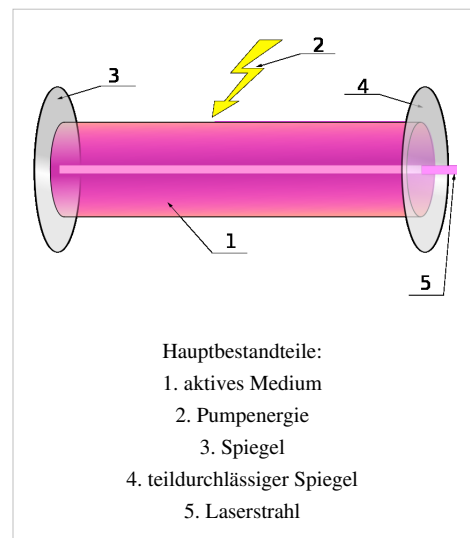
Keine auffallende Laserwirkung ergibt sich, wenn:

- das Licht die Materieansammlung vorzeitig verlässt, beispielsweise durch seitlichen Austritt aus dem Entladungsrohr;
- zu wenige angeregte Atome angetroffen wurden; man sagt dann, die Laserschwelle wird nicht erreicht.

Um eine hohe Intensität zu erzeugen, müssen sich also *sehr viele* Atome im metastabilen angeregten Zustand befinden. Bei den meisten Lasern wird das durch Spiegel erzwungen: Wenn ein Photonenbündel zufällig in Richtung senkrecht zu einem der Spiegel gestartet ist, muss es immer wieder in der Materieansammlung hin- und herlaufen, um möglichst sämtliche metastabilen Atome zu „melken“. Bei manchen Lasertypen wie He-Ne-Laser oder Laserdioden wird kontinuierlich Pumpenergie zugeführt, bei anderen Typen wie dem Rubinlaser wird zuerst kurzzeitig mit einer Blitzlampe optisch gepumpt, dann entsteht der Laserimpuls. Wenn es keine spontane Emission gäbe, würde in keinem Fall Laserlicht entstehen.

Technische Umsetzung

In einem Laser wird die Strahlung, die durch spontane Emission initiiert wurde, durch eine geeignete Anordnung zweier Spiegel immer wieder durch das Gebiet, in dem Besetzungsinversion herrscht (das sog. *aktive Medium*, z. B. ein Nd:YAG-Kristall oder eine Kohlenstoffdioxid-Gasentladung), geleitet. Eine solche Anordnung nennt man optischen Resonator (lat. resonare = zurückklingen, hallen). Im Resonator wird die Laserstrahlung beim Hin- und Herlaufen zwischen den beiden Spiegeln durch stimulierte Emission immer weiter verstärkt, bis der Leistungszuwachs innerhalb des Systems durch die Abnahme der Besetzungsinversion und die immer stärker ansteigenden Verluste ausgeglichen wird. Einer der beiden Spiegel ist teilweise (typisch: Promillebereich bis über 15 %, je nach Verstärkung) durchlässig (Auskoppelspiegel), um Strahlung aus dem Laser gewinnen, d. h. auskoppeln zu können. Die Feldstärke innerhalb des Resonators ist dadurch viel höher als im ausgekoppelten Strahl.



Lasermedien mit sehr hoher Verstärkung können auch mit nur einem Spiegel oder ganz ohne Spiegel lasern (so genannte Superstrahler, z. B. beim Stickstofflaser).

Ausgangsleistungen von typischen Lasersystemen reichen von wenigen Mikrowatt (μW) bis zu einigen Terawatt (TW) bei gepulsten Femto- oder Attosekunden-Lasern mit externer Nachverstärkung.

Die Energie, die benötigt wird, um die Atome oder Moleküle in die angeregten Zustände zu versetzen, muss dem System von außen zugeführt werden. Dieser Prozess wird als *Pumpen* bezeichnet. Es kann elektrisch in Form einer Gasentladung, durch Injektion von Ladungsträgern (Stromfluss) beim Halbleiterlaser oder optisch durch das Licht einer Gasentladungslampe (Blitzlampe oder Bogenlampe) oder eines anderen Lasers stattfinden.

Auch eine chemische Reaktion kann zum Pumpen dienen (siehe Excimerlaser).

Eigenschaften von Laserstrahlung

Die Strahleigenschaften eines Laserstrahles werden wesentlich durch die Art des Laser-Resonators bestimmt, insbesondere spielen dabei die Geometrie des aktiven Mediums und die Spiegelanordnung eine wichtige Rolle. Mit Lasern gelingt es, Licht in hohem Grade zu kontrollieren bzw. zu manipulieren (Brillanz, Intensität, Richtung, Frequenz, Polarisation, Phase, Zeit). Eine allgemeine Aussage über die Strahleigenschaften ist daher nicht möglich. Es ist auch nicht richtig, dass ein Laserstrahl immer ein enggebündelter Strahl mit geringer Frequenzbreite sein muss, wofür er allerdings oft gehalten wird. Je nach Zielsetzung ist eine Erzeugung derartiger Strahlen aber durchaus möglich. Eine herausragende, allgemeine Eigenschaft stellt jedoch die Möglichkeit zur starken Bündelung dar, mit der sehr hohe Leistungsdichten erzielt werden können. Die laterale Leistungsdichteverteilung von Laserstrahlen ist bei guter Strahlqualität ein Gaußprofil (Gauß-Strahl).

Generell kann man zu den Strahleigenschaften sagen, dass Laserstrahlen sich gegenüber gewöhnlichen Lichtquellen durch viele Unterschiede auszeichnen, die im Folgenden genannt werden.

Kohärenz

Hauptartikel: Kohärenz (Physik)

Bei einer normalen Glühlampe werden Lichtwellen nicht nur mit unterschiedlicher Wellenlänge ausgesendet, sondern auch in unbestimmter Phasenlage zueinander. Bei einem Laser dagegen sind die Wellen jeweils fast phasensynchron zueinander. Die Wellen sind über mehr oder weniger lange Strecken (Kohärenzlänge) fast phasengleich, was man sich zum Beispiel in der Holografie zunutze macht.

Polarisation

Die Polarisation von Laserstrahlen ist aufgrund polarisierender optischer Bauteile im Resonator (schräge Umlenkspiegel und Flächen (Brewster-Fenster), geringe Höhe des Resonators bei Halbleiterlasern) meistens linear. Oft ist das erwünscht, um polarisationsabhängige Kopplung und Strahlteilung durchführen zu können. Beim Schneiden von Metallen tritt jedoch insbesondere bei der linear polarisierten CO_2 -Laserstrahlung im Schnittpalt eine polarisationsabhängige Absorption auf, was eine schlechte und richtungsabhängige Schnittkantenqualität zur Folge hat. Daher wird beim Metallschneiden mit zirkularer Polarisation gearbeitet, die durch phasendrehende Verzögerungsplatten im Strahlengang des Laserstrahles erzielt wird.

Frequenz, Wellenlänge

Die Frequenz von Laserstrahlung wird durch das aktive Medium und dessen zum Lasern geeignete Energieübergänge bestimmt. Es gibt Stoffe, die auf vielen Wellenlängen zum Lasern angeregt werden können – jedoch meistens bei einer Wellenlänge besonders gut. Laser können sehr schmalbandige Strahlquellen sein, die Verstärkungsbandbreite (beim Kohlenstoffdioxidlaser zum Beispiel 9 bis 11 μm) ist jedoch meist höher als die Bandbreite der abgegebenen Strahlung – entweder schwingt der Laser von selbst im Maximum der Verstärkungsbandbreite (beim Kohlendioxidlaser zum Beispiel 10,6 μm) an oder man sorgt durch frequenzbestimmende Elemente für eine schmalbandige Emission auf einer einzigen Frequenz. Extreme Schmalbandigkeit ist z. B. bei der interferometrischen Längenmessung mittels Lasern von Bedeutung. Bei extremer Breitbandigkeit spricht man von Superkontinuum-Lasern, welche z. B. in der optischen Kohärenztomographie und zur Erzeugung von Frequenzkämmen eingesetzt werden. Die minimal erreichbare Bandbreite wird durch das Schawlow-Townes-Limit beschrieben.

Lasertypen nach der Signalform

Dauerstrich

Laserstrahlung von Dauerstrich-Lasern (englisch: continuous-wave laser, cw-laser) ist im Idealfall schmalbandig (monochrom, einfarbig), das heißt, es besteht nur aus Strahlung einer Wellenlänge. Insbesondere ist Dauerstrich-Laserstrahlung aus stabilen Laserresonatoren aufgrund des Vielfachumlaufes zeitlich beziehungsweise longitudinal (entlang seiner Ausbreitungsrichtung) kohärent, was bedeutet, dass die ausgesandten Wellenzüge nicht nur mit der gleichen Frequenz schwingen, sondern auch in der Phase über eine lange Strecke (die Kohärenzlänge) konstant sind. Dadurch zeigt ein solches Licht besonders ausgeprägte Interferenzerscheinungen. Während des Einschwingvorgangs des Dauerstrich-Lasers tritt zunächst oft Spiking, das heißt eine unregelmäßige Abgabe von Laserpulsen, auf. Dieses Verhalten nutzt ein modengekoppelter Laser gezielt aus, indem er die Spikes z. B. triggert oder synchronisiert.

Pulse

Im Gegensatz zum Dauerstrich-Laser erzeugt ein gepulster Laser pulsierende Strahlung. Pulse können durch gepulste Anregung oder auch durch Maßnahmen im Laser selbst (Güteschaltung) erzeugt werden. Bei sehr kurzen Pulsen benötigt das aktive Medium prinzipiell eine größere Verstärkungsbandbreite, innerhalb derer die beteiligten Frequenzen gekoppelt sind (Modenkopplung) und sich zu einem Impuls zusammensetzen. Je kürzer die Pulsdauer, desto breiter ist entsprechend den Gesetzen der Fourier-Transformation das erzeugte Spektrum und umso breiter muss das Frequenzband sein, innerhalb dessen das aktive Medium verstärken kann. Die geringsten erzielbaren Pulsdauern liegen in der Größenordnung von Femto- und Attosekunden (\rightarrow Femtosekundenlaser). Bei derart kurzen Pulsen (Länge des Strahlungspaketes $< 30 \mu\text{m}$, also ein Bruchteil einer Haarbreite) muss das verstärkende (aktive) Lasermedium eine große Verstärkungsbandbreite besitzen.

Laser können sich auch selbst zur Abgabe einer Pulsfolge synchronisieren, wenn im Resonator zum Beispiel ein nichtlinearer (sättigbarer) Absorber vorhanden ist. Die Wiederholfrequenz, mit der die Pulse in einem solchen Laser erzeugt werden, hängt u. a. bei der instantanen Kerr-Linsen-Modenkopplung (engl. *Kerr lens mode locking*, ein Verfahren zur Erzeugung einer stabilen Pulsfolge von Pulsen geringer Dauer) von der Resonatorlänge ab: Bei einem Resonator mit einer Länge von einem halben Meter beträgt diese etwa 300 MHz – die Periodendauer entspricht einem Hin- und Herlaufen (Umlauf) des Pulses im Resonator. Die Spitzenleistung wird bei jedem Umlauf größer, die Pulsdauer bleibt von allein sehr gering. Aus solchen Pulslasern werden zum Beispiel einzelne Pulse mittels optischer Schalter herausgelassen und weiterverstärkt. Mit weiteren Maßnahmen gelingt es, Spitzenleistungen bis in den Petawatt-Bereich zu erzeugen, die nur im Vakuum ungestört übertragen und fokussiert werden können. Luft wird von der hohen elektrischen Feldstärke des Lichts ionisiert.

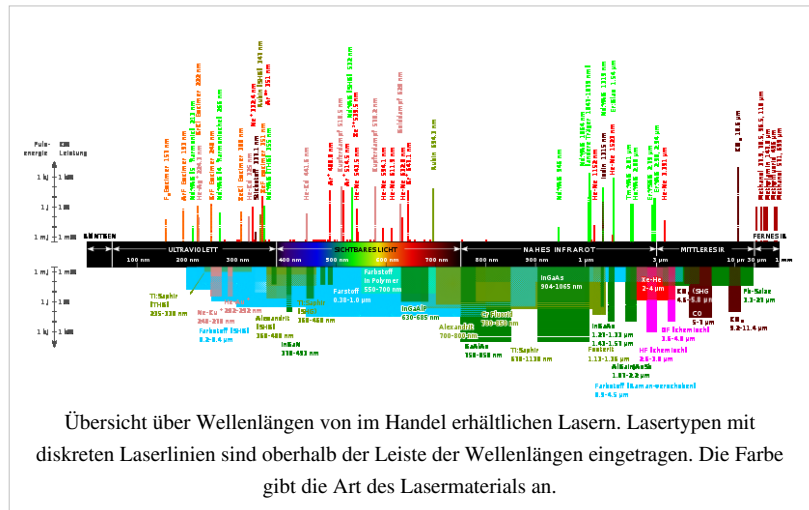
Die Gütemodulation (Q-switching) des Resonators mit akustooptischen Güteschaltern oder Pockelszellen sind weitere Techniken zur Erzeugung energiereicher Laserpulse mit geringer Dauer: Dabei wird die stimulierte Emission zunächst unterbunden, um sie dann bei inzwischen durch das Pumpen gesteigener Besetzungsinversion (hohe, im aktiven Medium gespeicherte Energie) schlagartig zu ermöglichen.

Lasertypen nach aktivem Medium

Laser werden meistens nach dem eingesetzten optisch aktiven Material kategorisiert und benannt.

Gaslaser

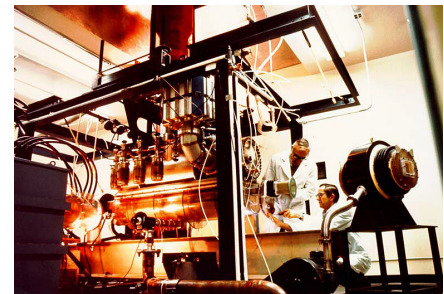
→ *Hauptartikel Gaslaser*



Bei Gaslasern ist das aktive Medium gasförmig. Zumeist werden Gaslaser elektrisch durch eine Gasentladung im aktiven Medium selbst gepumpt. Beispiele:

- Helium-Neon-Laser (HeNe-Laser): Wichtigste Emissionswellenlänge bei 632,8 nm (rot). Weiterhin auch 1152,3 nm (infrarot), 543,5 nm, 594,1 nm und 611,9 nm.
- Kohlendioxidlaser (CO_2 -Laser): etwa 10,6 μm Wellenlänge (mittleres Infrarot), wichtiger Industrielaser
- Kohlenmonoxidlaser (CO-Laser): etwa 6–8 μm Wellenlänge (mittleres Infrarot), funktioniert nur gekühlt
- Stickstofflaser (N_2 -Laser): 337,1 nm (ultraviolett)
- Argon-Ionen-Laser, mehrere Linien bei 457,9 nm (8 %), 476,5 nm (12 %), 488,0 nm (20 %), 496,5 nm (12 %), 501,7 nm (5 %), 514,5 nm (43 %) (blau bis grün)
- Helium-Cadmium-Laser (HeCd-Laser): wichtigste Laserquelle für blau (442 nm) und nahes UV (325 nm)
- Krypton-Ionen-Laser, mehrere Linien bei 350,7 nm; 356,4 nm; 476,2 nm; 482,5 nm; 520,6 nm; 530,9 nm; 568,2 nm; 647,1 nm (stärkste Linie); 676,4 nm; 752,5 nm; 799,3 nm (blau bis tiefrot)
- Sauerstoff-Ionen-Laser
- Xenon-Ionen-Laser
- Mischgas-Laser, enthalten keine reinen Gase, sondern eine Mischung verschiedener (meistens Argon und Krypton)
- Excimerlaser, z. B. KrF (248 nm), XeF (351–353 nm), ArF (193 nm), XeCl (308 nm), F_2 (157 nm) (alles ultraviolett)
- Metaldampflaser, z. B. Kupferdampflaser, bei 510,6 und 578,2 nm. Aufgrund der hohen Verstärkung kann ein Kupferdampflaser auch ohne Resonatorspiegel betrieben werden.
- Metallhalogenid-Laser, z. B. Kupferbromid-Laser, bei 510,6 und 578,2 nm. Aufgrund der hohen Verstärkung kann ein Kupferbromidlaser auch ohne Resonatorspiegel betrieben werden.

Eine Sonderform sind die chemisch gepumpten Laser. Hier erfolgt das Pumpen durch eine chemische Reaktion im bzw. des aktiven Mediums. Das Gas ist nach der Reaktion verbraucht und kann dementsprechend nur einmal



Entwicklung des Kohlenmonoxidlasers CO-EDL (Carbon Monoxide Electric Discharge Lasers) des Northrop Research and Technology Centers mit Unterstützung des Office of Naval Research der US Navy, 1968



Helium-Neon-Laser

verwendet werden. Chemische Laser sind für transportable Hochleistungsanwendungen geeignet, sie haben fast ausschließlich im militärischen Bereich Bedeutung. Beispiele:

- HCl-Laser
- Iod-Laser

Farbstofflaser

→ *Hauptartikel Farbstofflaser*

Bei diesem Lasertyp ist ein organischer Farbstoff in alkoholischer Lösung (oft Methanol oder Ethanol) das aktive Medium. Die Farbstofflösung wird dabei ständig umgepumpt, um ein Ausbleichen (photochemische Degeneration) zu vermeiden. Beispiele für Farbstoffe:

- Stilbene – Klasse von Farbstoffen im blauen Spektralbereich
- Cumarine – Klasse von Farbstoffen im blauen bis grün-gelben Spektralbereich
- Rhodamine – Klasse von Farbstoffen im gelben bis orange-roten Spektralbereich
- DCM – Roter Farbstoff
- LDS – Klasse von Farbstoffen im IR-Bereich

Farbstofflaser werden im allgemeinen durch andere Laser gepumpt. Dabei nimmt man einen Leistungsverlust durch den geringen Wirkungsgrad des Farbstofflasers in Kauf, um andere Wellenlängen zu erzeugen. Gepumpt werden kann sowohl kontinuierlich (kurz *cw* für engl. *continuous wave*) als auch gepulst.

Festkörperlaser

→ *Hauptartikel Festkörperlaser*

Der Festkörperlaser war der erste Lasertyp; Maiman entwickelte im Jahre 1960 den Rubinlaser.

Bei Festkörperlasern wird ein Trägerwerkstoff bzw. Wirtskristall mit Ionen eines fremden Stoffes dotiert. Diese Ionen bilden, eingebettet im Wirtsmaterial, das eigentliche aktive Medium. Die Laserübergänge der Ionen sind innerhalb des d-Orbitals. Diese Orbitale sind nicht an chemischen Bindungen beteiligt. Das Trägermaterial (Wirtskristall, Glas) nimmt daher nur geringen Einfluss auf die Eigenschaften der Ionen.

Festkörperlaser werden nach der Art und Form des Wirtsmaterials und den Dotierungselementen unterschieden. Beispiele für Wirts- bzw. Trägermaterialien:

- Glas (Stabform oder Faserlaser)
 - Vorteil: einfache Herstellung auch in großen Dimensionen
 - Nachteil: geringe Wärmeleitfähigkeit, geringe Festigkeit
- Al_2O_3 (Korund, Saphir) (z. B. Rubinlaser (Chrom-Dotierung), Titan:Saphir-Laser)
 - Vorteil: hohe Wärmeleitfähigkeit, hohe Festigkeit
 - Nachteil: relativ hohe Absorption, teuer
- YAG (Yttrium-Aluminium-Granat-Laser, → Nd:YAG-Laser) Dotierung Nd, Er, Yb
 - Vorteil: hohe Wärmeleitfähigkeit, hohe Festigkeit, geringe Absorption
 - Nachteil: keine bekannten
- Yttrium-Vanadat (YVO_4), Dotierung Nd
- Fluoride wie YLF, BYF oder KYF
- Sesquioxide wie Sc_2O_3 und Lu_2O_3

Beispiele für Dotierungsmaterialien:

- Chrom war das Dotierungsmaterial des ersten Lasers, des Rubinlaser (694,3 nm (rot)). Aufgrund der geringen Effizienz wird es heute kaum noch verwendet.

- Neodym: Der wichtigste kommerzielle Festkörperlaser Nd:YAG-Laser, bei 1064 nm (infrarot), beziehungsweise frequenzverdoppelt bei 532 nm (grün). Auch möglich sind: Nd:Glas, Nd:YLF ...
- Ytterbium: 1030 nm, erlaubt im Laserbetrieb einen hohen Wirkungsgrad $> 50\%$. Es bedarf dazu allerdings eines schmalbandigen Pumpens mit Laserdioden (940 nm). Das wichtigste Material mit dieser Dotierung ist der Yb:YAG-Laser, z. B. hochdotiert als Scheibenlaser mit einer Wellenlänge von 1030 nm.
- Titan: ein wichtiger modengekoppelter Festkörperlaser Titan:Saphir-Laser, 670–1100 nm (rot-infrarot), aufgrund breitbandiger Verstärkung für Pulse im fs-Bereich geeignet
- Erbium: Wellenlänge 3 μm , Pumpen mit Diodenlasern bei 980 nm, sogenannter augensicherer Laser, Verwendung für Laser-Entfernungsmesser und in der Medizin. Bei Er:Glas Wellenlänge 1,55 μm ^[7], Verwendung in der Nachrichtentechnik (Lichtwellenleiter)
- Praseodym: Ein relativ neues Laserion. Sehr interessant aufgrund mehrerer Übergänge im sichtbaren Spektralbereich (444 nm (blau), 480 nm (blau), 523 nm (grün), 605 nm (orange) und 640 nm (rot)). Hervorzuheben ist hier der Übergang bei 523 nm (grün), da hier keine Frequenzverdopplung notwendig ist, wie etwa beim Nd:YAG-Laser, um einen grünen Laser zu betreiben.

Formen des aktiven Mediums:

- Stablasers
- Mikrokristalllaser
- Slablasers
- Faserlaser
- Scheibenlaser

Farbzentrenlaser

Wie bei dem Festkörperlaser handelt es sich bei dem Farbzentrenlaser um einen Laser, bei dem Defekte (Fremdionen, Gitterfehler, Ladungen) in einen Trägerkristall eingebettet sind. Die Laserübergänge bei dem Farbzentrenlaser werden aber durch die Wechselwirkung der Störstellen mit dem Gitter erzeugt. Beispiele:

- Lithium-Fehlstellen in Lithiumfluorid
- Fehlstellen in Natriumchlorid
- weitere Kombinationen, z. B. KCl:Li, KCl:Na, RbCl:Li

Farbzentrenlaser erzeugen nur geringe Leistungen von typ. unter 100 mW.

Halbleiterlaser

→ *Hauptartikel*: Laserdiode

Beim Halbleiterlaser (auch Laserdiode genannt) werden stromdurchflossene pn-Übergänge im Halbleiter zur Besetzungsinversion verwendet. Es handelt sich dabei um direkt elektrisch gepumpte Laser. Die Leistung von Laserdioden mit guter Strahlqualität ($M^2 < 1,5$) beträgt weniger als ein Watt. Multimode-Dioden erreichen bei schlechterer Strahlqualität ($1,5 < M^2 < 100$) Leistungen bis etwa 20 W.

Mehrere Einzeldioden können in einem schmalen Chip (ca. 0,1 mm \times 1 mm \times 10 mm) nebeneinander integriert sein. Diese sogenannten Barren (engl. *bar*) liefern, auf eine Wärmesenke (Kühlkörper) montiert, Ausgangsleistungen größer 100 Watt (Barren mit über 200 Watt kontinuierlicher Ausgangsleistung sind in der Erprobung, Stand 2008). Die Einzeldioden sind dabei elektrisch parallel geschaltet. Den montierten Barren nennt man auch *submount*.

Durch Kopplung vieler, in einem sogenannten *stack* (Stapel) untergebrachter Barren bzw. *submounts* werden Leistungen im Kilowattbereich bei entsprechend schlechter Strahlqualität erreicht ($M^2 > 100$). Bis zu sechs Stapel kann man durch verschiedene Wellenlängen (üblich bis drei) und Polarisationsrichtungen verlustarm ohne Verschlechterung der Strahlqualität optisch addieren. Damit erreicht man Leistungen im zweistelligen Kilowattbereich.

Diodenlaser werden auch zum optischen Pumpen von Festkörperlasern (Laserstäbe, Scheibenlaser, Faserlaser) verwendet. Zum optischen Pumpen von Festkörperlasern durch Laserdioden muss die Pumpwellenlänge exakt getroffen werden, daher ist hierbei keine Wellenlängenkopplung möglich. Die Diodenlaser müssen jedoch hierzu ohnehin nicht zu Strahlen mit hoher Leistungsdichte zusammengefasst werden.

Weitere Halbleiterlaser sind:

- optisch gepumpte Halbleiterlaser, auch Halbleiterscheibenlaser
- Quantenkaskadenlaser
- oberflächenemittierende Laser (VCSEL) (sowohl optisch als auch elektrisch gepumpt).

Freie-Elektronen-Laser (FEL)

→ Hauptartikel *Freie-Elektronen-Laser*

Der Freie-Elektronen-Laser ist eine Synchrotronstrahlungsquelle, die gerichtete Strahlung (Wellenlängen von Mikrowellen bis in den Röntgenbereich, sehr hohe Brillanz) aus der Energie eines Elektronenstrahles erzeugt. Aufgrund der Kohärenz (meistens nur örtliche Kohärenz) der Strahlung und der Abhängigkeit der Verstärkung von der vorhandenen Photonenanzahl wird er als Laser bezeichnet, obwohl er im eigentlichen Sinne kein Laser ist, da die Strahlung nicht durch stimulierte Emission erzeugt wird. Der Elektronenstrahl eines FELs kann durch ein Synchrotron oder einen Linearbeschleuniger bereitgestellt werden.

Freie-Elektronen-Laser besitzen außer im IR-Bereich oft keinen Resonator. Für Wellenlängen unterhalb des fernen UV kann es auch keinen Resonator geben, da es keine Materialien gibt, die solche Strahlung reflektieren.

Laser-Resonatoren

Laser-Resonatoren werden bei Lasergeräten verwendet, um den Strahl mehrfach hin und her durch das verstärkende aktive Medium laufen zu lassen und so eine ausreichende Verstärkung zur Laserschwelle zu erreichen. Ein Laser-Resonator besteht häufig aus zwei Spiegeln, zwischen denen die Strahlung reflektiert wird, sodass sich der Weg durch das Lasermedium verlängert. Dadurch kann ein Photon sehr oft stimulierte Emission hervorrufen. Im Resonator werden nur bestimmte Frequenzen verstärkt, die die Resonanzbedingung erfüllen, für die also gilt:

$$L = q \frac{\lambda}{2} \quad \Leftrightarrow \quad \nu = q \frac{c}{2L}$$

Dabei ist q eine natürliche Zahl und L die Resonatorlänge. Andere Frequenzen werden durch destruktive Interferenz ausgelöscht.

Ein anderer Aufbau für den Resonator ist der Ringresonator, bei dem das Licht durch mehrfache Reflexion einen geschlossenen Pfad durchläuft^[8].

Die Güte des Resonators (d. h. das Verhältnis zwischen hin- und herreflektierter Strahlung zu austretender Strahlung) muss bei gering verstärkenden Medien besonders hoch sein. Ein Beispiel hierfür ist der Helium-Neon-Laser. Die Resonatorgüte kann oft mittels in ihm befindlicher optischer Komponenten zeitabhängig, aber auch hinsichtlich der Wellenlänge und des lateralen Strahlprofils beeinflusst werden, um eine gute Strahlqualität, Frequenzkonstanz und Kohärenz sowie Pulsformung des Laserstrahls zu erzielen. Solche Komponenten sind z. B. Blenden, optische Schalter (→ Güteschalter) oder frequenzselektive Endspiegel (→ DFB-Laser, dichroitischer Spiegel). So kann z. B. beim Argonlaser durch Wahl des dichroitischen Endspiegels das Anschwingen nur einer der mehreren möglichen Laser-Emissionswellenlängen erreicht werden.

Die Resonatorstabilität kann bei einfachen Resonatoren (Spiegel – aktives Medium – Spiegel) mit den sog. g-Faktoren berechnet werden. Sie sind definiert als:

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1}$$

$$g_2 = 1 - \frac{L}{R_2}$$

Hierbei sind R_1 und R_2 die Krümmungsradien der beiden Resonatorspiegel und L die Gesamtlänge des Resonators. Bei den Resonatoren unterscheidet man grundsätzlich zwei verschiedene Arten:

Stabile Resonatoren

Damit der Resonator stabil ist, muss gelten:

$$0 < g_1 \cdot g_2 < 1$$

Ein paraxialer Strahl verlässt selbst nach beliebig vielen Reflexionen den Resonator nicht. Ist das Ergebnis gerade 0 oder 1, so nennt man den Resonator *grenzstabil*. Ein Beispiel hierfür ist der konfokale ($g_1 = g_2 = 0$), hemisphärische ($g_1 = 0, g_2 = 1$), konzentrische ($g_1 = g_2 = -1$) oder plan-plan Resonator ($g_1 = g_2 = 1$), welcher auch als Fabry-Perot-Resonator bekannt ist.^[9] In der Praxis sind diese Art Laser sehr schwierig zu justieren und laufen meistens nur dadurch, dass andere Linseneffekte den Resonator in den Bereich der Stabilität führen. Ein solcher Effekt kann beispielsweise ein thermischer Linseneffekt sein, bei welchem durch einen Temperaturgradienten im Resonator eine thermische Linse entsteht.

Stabile Resonatoren beeinflussen die Strahlqualität und die Kohärenzeigenschaften des Laserstrahls.

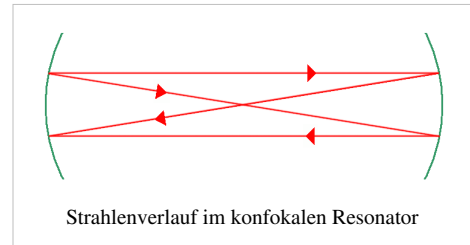
Vorteil: gute Strahlqualität durch geringe Beugungen innerhalb des Resonators. Nachteil: schlechte Ausnutzung des Lasermediums, da der Lichtstrahl immer wieder an den gleichen Atomen vorbeifliegt.

Instabile Resonatoren

Bei instabilen Resonatoren gilt $g_1 g_2 > 1$ oder $g_1 g_2 < 0$. Für diese sind die Beugungsverluste sehr hoch und es existiert kein Gauß-Strahl als Grundmode. Jedoch kann man durch ein aktives Medium mit großem Durchmesser die instabilen Resonatoren vorteilhaft nutzen, da diese eine gleichförmige Intensitätsverteilung im Resonator erzeugen. Voraussetzung hierfür ist jedoch eine hohe Verstärkung des lasernden Mediums.

Instabile Resonatoren werden daher meistens in Lasern verwendet, die eine hohe Verstärkung pro Resonatorumlauf besitzen und bei denen vorrangig hohe Ausgangsleistung (Kohlendioxidlaser) und weniger die Strahlqualität maßgebend sind.

Von besonderer Bedeutung ist der asymmetrische konfokale instabile Resonator, da dieser einen parallelen Ausgangsstrahl liefert.



Moden

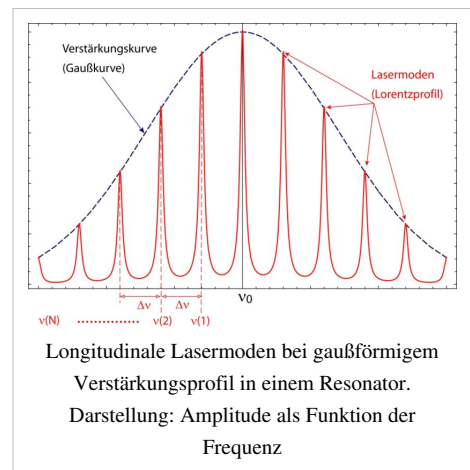
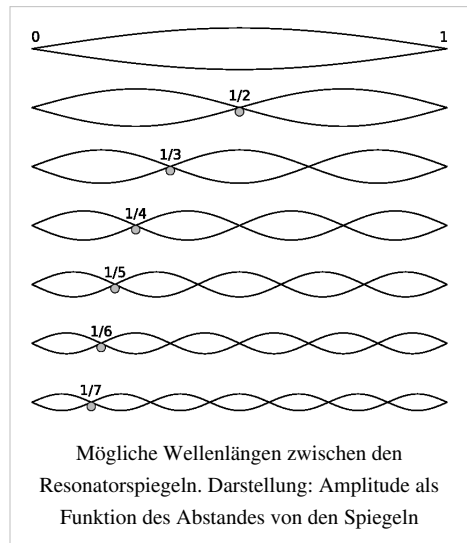
Longitudinale Moden

Unterschiedliche Schwingungsformen werden Moden genannt. Als longitudinal bezeichnet man die Schwingung längs der Ausbreitungsrichtung der Strahlung. Bildlich ausgedrückt handelt es sich dabei um Intensitätsberge und -täler im Abstand einer halben Wellenlänge. Bei einem He-Ne-Laser von einigen Zentimetern Länge könnte man zwischen den Spiegeln etwa 600.000 Intensitätsberge zählen, bei einer kurzen Laserdiode nur einige Tausend.

Je nach Bauart werden vom Resonator bestimmte Wellenlängen und deren Vielfache besonders verstärkt, weil sich nur für bestimmte Wellenlängen eine stehende Welle zwischen den Spiegeln ergibt.

Das Bild zeigt die Intensitätsverteilung rund um die Grundmode (angegeben als mittlere Intensität in Abhängigkeit von der Frequenz ν_0).

Genauer gesagt, gilt für die möglichen Lichtfrequenzen in einem Laserresonator der Zusammenhang:



$$\nu(N) = N \cdot \frac{c}{2L},$$

$\nu(N)$ ist dabei die zulässige Frequenz der N -ten Mode, c die Lichtgeschwindigkeit und L die Resonatorlänge (Abstand zwischen den Resonatorspiegeln). In dieser Formel kann man die Frequenz durch den gebräuchlicheren Begriff Wellenlänge ersetzen und erhält für die möglichen Wellenlängen λ in einem Resonator:

$$2L = N \cdot \lambda$$

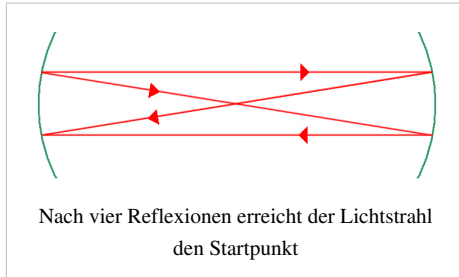
Ein optischer Resonator wirkt also wie ein Kammfilter, das bestimmte aufeinanderfolgende Frequenzen verstärkt oder abschwächt.

Durch gaußförmige Dopplerverbreiterung der an sich scharfen Emissionslinie entsteht die gaußförmige Einhüllende über eine gewisse Anzahl von „Kammzinken“. Auf Grund obiger Resonatoreigenschaft (und der wieder anschließenden Dopplerverbreiterung) werden mehrere Teillinien der Emissionslinie des aktiven Mediums im Resonator verstärkt. Die einzelnen im Resonator verstärkten Teillinien haben ein Lorentz-Profil mit sehr geringen Linienbreiten wegen der großen Länge der Wellenzüge im Resonator und da bei der Resonanz Störeffekte wie der Doppler-Effekt in den Hintergrund treten. Somit erhält man nebenstehendes Spektrum mit mehreren Lorentz-Kurven (den sogenannten Lasermoden) mit einer gaußförmigen Einhüllenden. Da jedoch eine Mindestintensität nötig ist,

damit im Resonator noch eine Verstärkung stattfinden kann, erhält man nur eine begrenzte Anzahl Moden, da Moden, die zu weit vom Linienschwerpunkt entfernt sind, zu wenig intensiv sind um noch verstärkt zu werden. Die Strahlung benachbarter Moden ist immer orthogonal zueinander polarisiert.

Der Frequenzabstand zwischen zwei benachbarten Moden ist:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}$$



Es kann sich auch ein Zustand einstellen, bei dem der Strahl zweimal durch den Resonator hin- und herlaufen muss, um wieder zum Ausgangspunkt zu gelangen. Dadurch wird die effektive Resonatorlänge verdoppelt, und die Modenabstände werden auf $\Delta\nu = \frac{c}{4L}$ halbiert.

Die Halbwertsbreite Δ der Maxima ist

$$\Delta = \frac{\text{FSR}}{\mathcal{F}}$$

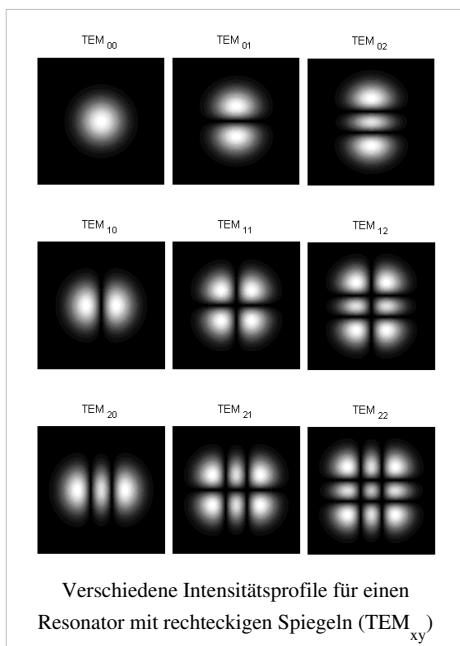
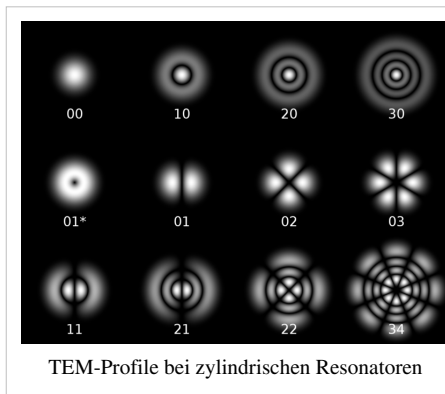
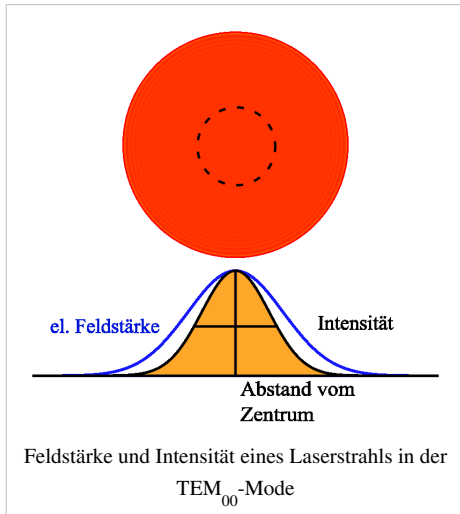
Der dabei auftretende Faktor \mathcal{F} wird als *Finesse* bezeichnet und ist die entscheidende Kennzahl für Resonatoren, die das spektrale Auflösungsvermögen angibt. FSR gibt den freien Spektralbereich des Resonators an. Die Finesse hängt bei Vernachlässigung der Verluste im Resonator nur vom Reflexionsfaktor R der Spiegel ab:

$$\mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R}$$

Je nach verwendeten Spiegeln kann die Finesse Werte von etwa 10 bis zu mehreren 100.000 annehmen.

In vielen Anwendungen sind mehrere longitudinale Moden unerwünscht. Eine Verkürzung der Resonatorlänge, um nur eine Mode zu erzeugen, macht aber meist keinen Sinn, da dadurch nicht die gewünschte Lichtleistung erzielt werden kann. Man behilft sich, indem im Resonator ein sogenanntes Etalon eingebracht wird. Das Etalon stellt im Prinzip einen „Resonator im Resonator“ dar, welcher nur Wellen der gewünschten Mode verstärkt, andere Moden aber unterdrückt. Man spricht in diesen Fall von *Monomode*- oder *Singlemode*-Lasern (im Gegensatz zu *Multimode*-Lasern).

Transversale Moden



Als transversale Moden bezeichnet man die Verteilung der Phasenlage der Wellen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Bildet sich also eine Mode aus, die nicht den Raum senkrecht zu den Resonatorspiegeln ausfüllt, sondern etwas schräg verläuft, so wird der Licht- und Resonatorweg länger, und die Frequenz verschiebt sich etwas. Dieses führt einerseits zum Konkurrieren um angeregte Mediumsmoleküle zwischen den verschiedenen Frequenzen (*Mode Competition*), andererseits können sich so stehende Wellen ausbilden, die Knotenlinien innerhalb des Laserprofils aufweisen. Ob und wie sie in einem Laserstrahl vorkommen, lässt sich durch optische Bauelemente wie Polarisationsfilter oder diffraktive optische Elemente bestimmen.

Die Art der transversalen Moden hängt von der Konstruktion des Laser ab:

- Bei Verwendung ebener Reflektoren treten TEM-Moden auf, das heißt, in Ausbreitungsrichtung besitzt die elektromagnetische Welle keine elektrischen oder magnetischen Komponenten. Das trifft auch für die Lichtausbreitung im Freiraum zu.
- Die Mehrzahl der Laser verwendet gekrümmte Spiegel, dann treten fast immer Hybrid-Moden auf, die auch in Ausbreitungsrichtung elektrische und magnetische Komponenten besitzen.

(In Hohlleitern mit metallischer Hülle beobachtet man auch reine TE- bzw. TM-Moden, weil in der Hüllfläche elektrische Ströme fließen können).

Bei zylindrischem Querschnitt des Lasers hat die Strahlintensität im Idealfall ein Gauß-Profil; diese Mode wird als TEM_{00} -Mode bezeichnet (siehe auch: Moden#Weitere akustische Schwingungsmoden). Es können aber auch andere Profile mit Winkel- und radialen Abhängigkeiten auftreten, die sich durch Laguerre-Polynome berechnen lassen. Ist diese Zylindersymmetrie durch Polarisationsfilter oder Brewster-Fenster gestört, treten rechteckige Symmetrien auf, die durch Hermite'sche Polynome berechnet werden. Abhängig von der Anzahl ihrer Knotenlinien in horizontale und vertikale Richtung werden sie als TEM_{xy} -Mode bezeichnet. Für diese Moden ist teilweise der Lichtweg durch den Resonator bis zum Ausgangspunkt anders, das heißt, die Resonatorlänge erscheint verändert. Dieses kann zu einer Verfälschung der Longitudinalmodenspektren führen, indem sich die Spektren verschiedener Transversalmoden überlagern.

Anwendungen von Lasern

Materialbearbeitung

Laser lassen sich in allen Bereichen der Fertigungstechnik nach DIN 8580 für verschiedene Fertigungsverfahren einsetzen. Sie werden hierzu an einer Laserbearbeitungsmaschine oder einem Laserscanner betrieben:

- Urformen:
 - Selektives Lasersintern oder Stereolithographie (Rapid Prototyping-Verfahren).
- Umformen:
 - Laserstrahlbiegen von Metallen und von Silizium.
 - Laserunterstütztes Biegen: Erhöhte Bruchdehnung durch vorherige Behandlung mit Laser.
- Trennen/Abtragen:
 - Laserschneiden verschiedenster Materialien wie Holz, Kunststoff, Papier, Metalle
 - Laserbohren, auch Mikro-Laserbohren und *Trepanieren* (z. B. Löcher für die Effusionskühlung in Turbinenschaufeln, Bohren von Microvias in Leiterplatten)
 - Abtragen: Beseitigen von Material durch Schmelzen, Verdampfen oder bis zum Plasma erhitzen; oder auch photochemischer Abbau von Substanzen (Laserablation).
 - Gravur: Verbreitetes Verfahren für die Laserbeschriftung bzw. -Gravur aller Werkstoffe (z. B. Glasgefäße, Halbleiterbauelemente, Kugellager) in der Serienfertigung. Ein dem Gravieren ähnliches Verfahren ist das Laserritzen, welches in spröden Materialien Anrisslinien für ein nachfolgendes Brechen erzeugt.
 - Lasertrimmen: Ein Verfahren zum Abgleich von Widerständen.
- Fügen:
 - Laserstrahlschweißen und -löten sowohl im Makrobereich wie der Automobilindustrie, dem Flugzeugbau^[10], dem Maschinenbau oder im Schiffbau, aber auch im Mikrobereich wie der Elektronikfertigung. Neben Metallen können auch viele andere Werkstoffe wie Kunststoffe, Gläser, Silizium oder Keramik mit diesem Verfahren verschweißt und verschmolzen werden.
- Beschichten:
 - Laserstrahlpulverbeschichten und Pulsed Laser Deposition.
 - Laserauftragschweißen: Reparaturverfahren durch Aufschmelzen/Einschweißen von Metallpulver.
- Stoffeigenschaften ändern:
 - Laserstrahlhärten: Randschichtenhärtung von Metallen.
 - Laserpolieren: Umschmelzendes Verfahren zur Reduzierung von Oberflächenrauheiten von Metallen, Gläsern und Kunststoffen.
 - Isotopentrennung: Hier wird die unterschiedliche Atom- oder Molekülresonanz der verschiedenen Isotope oder deren organischer Verbindungen ausgenutzt, um sie mittels darauf abgestimmter Laser zu separieren (→ AVLIS, MLIS).



Laserbeschriftetes Schaltkreis-Gehäuse aus Keramik;
Zeichenhöhe ca. 1,34 mm

- Drucktechnik
 - Belichten der Trommel in Laserdruckern, belichten oder gravieren der Druckwalzen von Druckmaschinen
 - Beschriften mit Laser: Beschriften/Bedrucken von Papier, Pappe, Holz, Leder, Kunststoffe und Metall durch Schmoren. Auch Farbabtrag von beschichteten Gegenständen; Farbumschlag auf Kunststoffen, Anlassbeschriftung auf Metall.
- Markierung
 - Projektion sichtbarer Laserstrahlen bei der Holzbearbeitung, Holzrahmenbau und der Fertigung von Leimbindern: Markierung der Position der Holzstreben und –balken sowie des Verlaufes von Strom- und Wasserleitungen, Positionieren der Pressböcke. Die Kontur der fertigen Leimbinder kann auf das Leimbett projiziert, verschoben und gedreht werden; die Positionsdaten können vom Laserprojektor direkt an die CNC-Fräse übertragen werden.
 - umlaufende Laserstrahlen oder Projektion eines Fächers oder Kreuzes im Trockenbau



Ein gelasertes Logo auf einem Apfel

Steuerungstechnik

- Laser-Interferometer zur hochgenauen Positionsbestimmung, z. B. in Justier- und Belichtungsautomaten der Mikroelektronik
- Lasergeführte fahrerlose Transportfahrzeuge (AGV): Spurführung für fahrerlose Transportsysteme entlang eines Laserstrahls

Medizin

- In der Allgemeinmedizin wird der Laser hauptsächlich in der Diagnose eingesetzt, z. B. bei der Messung von Blutstrom (in der Medizin Flowmetrie genannt) und -zirkulation.
- In der Augenheilkunde wird Laserlicht niedriger Leistung zur Diagnose eingesetzt, z. B. in der optischen Kohärenztomografie (OCT). In der Therapie kann mit höherer Leistung eine sich ablösende Netzhaut am Augenhintergrund verschweißt werden. Außerdem kann Fehlsichtigkeit durch Abtragung von Hornhautoberfläche korrigiert werden (z. B. LASIK-Operation, Femto Lasik).
- In der Chirurgie, Gefäßchirurgie und Phlebologie wird der Laser hauptsächlich im Bereich Endoskopie oder als Laserskalpell eingesetzt. Eine weitere Anwendung ist die Behandlung von defekten Venen (Krampfadern). Hierbei kann der Laser endovenös (Laser-Lichtleiter wird in die Vene eingebracht) angewendet werden. Dieses Laser-Behandlungsverfahren ersetzt dabei das Entfernen der Vene durch „Stripping“. Die Laser-Behandlung ist in vielen Fällen schonender und ambulant durchführbar.
- In der Dermatologie lassen sich mit Laserstrahlen Schnitte und Verödungen durchführen. Blutgefäße können durch Laser bestimmter Wellenlängen (Farbstoff-Laser; Neodym:YAG-Laser; KTP-Laser; Krypton-Laser; Kupferdampf-Laser) koagulierte werden. Pigmentflecken können mit Hilfe ablatierender (= schälender) Laser (Erbium:YAG; CO₂) abgetragen oder mittels gütegeschalteter Neodym:YAG-Laser selektiv zerstört werden. Subkutanen (= unter der Haut gelegenes) Pigment kann mit Hilfe eines gütegeschalteten (ultrakurz gepulsten) Lasers (Neodym; Rubin; Alexandrit) zerstört und damit entfernt werden, ohne die Hautoberfläche selber zu verletzen. Durch Verwendung von langgepulsten (5–500 ms Pulsdauer) Alexandrit-, Rubin-, Neodym- oder Diodenlasern können Haarwurzeln durch die selektive Erhitzung pigmentierter Haare dauerhaft zerstört werden. Ein Excimer-Laser mit einer Wellenlänge von 308 nm (XeCl) wird zur gezielten Behandlung entzündlicher Hauterkrankungen, vorrangig der Psoriasis (Schuppenflechte) eingesetzt. Oberflächliche Unebenheiten der Haut (Knötchen, Fältchen) werden mit ultragepulsten CO₂- oder Erbium:YAG-Lasern zur kosmetischen Verbesserung

des Hautbildes geglättet (Resurfacing). Durch Laserlicht können auch selektiv dermale Anteile erwärmt werden, was in erster Linie dem Kollagenaufbau zur Straffung der Haut dienen soll („Subsurfacing“). Vom Laser sind sogenannte Blitzlampen abzutrennen, die kein monochromatisches, kohärentes Licht emittieren. Ebenso gibt es unterschiedliche Diagnosetechniken der konfokalen Mikroskopie, sowie der optischen Kohärenztomografie (OCT). Diese Techniken spielen aber in der Routinemedizin keine Rolle, sondern dienen eher wissenschaftlichen Fragestellungen.

- In der Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde werden Laser zur Abtragung von Veränderungen an den Stimmbändern bei larynx-mikroskopischen Eingriffen verwendet, außerdem zur Teilabtragung der Mandeln (Tonsillotomie) und von Tumoren in Mund und Rachen (z. B. beim Zungenkarzinom). Bei der Operation wegen Otosklerose wird der Laser zur Perforation der Steigbügel-Fußplatte verwendet.
- In der Zahnmedizin kann der Laser z. B. Erbium:YAG, für den Abtrag von Zahnhartsubstanz („Bohren ohne Bohrer“) oder in der Parodontologie (Keimreduktion und Konkremententfernung in entzündeten Zahnfleischtaschen) verwendet werden. Diodenlaser werden in der Zahnmedizin für chirurgische Eingriffe, z. B. Lippenbändchenentfernung, für die Keimreduktion in der Endodontie (Wurzelkanalbehandlung) oder für die Zahnweißung (Bleaching) verwendet. Der Vorteil der Laserbehandlung gegenüber der konventionellen Methode ist die, dass der Patient weniger Schmerzen hat, die Setzung von Nähten teilweise überflüssig wird, es weniger blutet, da die Wunde verödet ist und die behandelte Stelle gleichzeitig dekontaminiert (keimfrei) wird.
- In der Krebstherapie wird er für die photodynamische Therapie eingesetzt.
- In der Urologie zur Behandlung von Nieren- und Harnleitersteinen und der Prostata.
- Die Lasermikrodissektion ist ein Verfahren zur Gewinnung von kleinsten Proben aus Gewebsschnitten oder Zellkulturen.
- Noch in der Forschung befindliche Techniken betreffen u. a. die Versuche, Nerven unter Einsatz von Laserlicht zielgerichtet wachsen zu lassen.
- Alternativmediziner benutzen sogenannte Softlasergeräte.
- Die Sicherheitsbestimmungen für Laser werden in der EN 60601-2-22 behandelt.

Messtechnik

Eine Reihe von Messgeräten sind auf Laserbasis konstruiert:

- Durch Interferenzen oder das *Kohärenzradar* sind Präzisionsmessungen möglich.
- Beim Tunnelbau kann durch Laserstrahlen ein gerader Tunnelvortrieb erreicht werden.
- Im Bauwesen wird er zum Nivellieren oder beim Kanallaser genutzt.
- zur optischen Abstandsmessung:
 - Light detection and ranging (Lidar) ist eine dem Radar verwandte Methode zur Fernmessung atmosphärischer Parameter.
 - In der Verkehrsüberwachung werden Laserpistolen zur Geschwindigkeitsmessung verwendet.
- In Barcodelesegeräten werden die Laser zum Abtasten von Barcodes verwendet. Dabei wird der Strahl über ein Spiegelrad gleichmäßig über den Barcode linienförmig geführt. Der reflektierte Strahl wird über einen Fototransistor als Hell-Dunkel-Sequenz ausgewertet.
- In Brandmeldern („Lasermelder“)
- Schwingungsanalyse und Formerfassung durch elektronische Speckle-Muster-Interferometrie (ESPI).
- Lasermikrofon: ein Gerät zur Aufnahme von Schall, das einen Laser zur Abstandsmessung einer Membran verwendet.
- Laserextensometer und Laser-Doppler-Extensometer zur berührungsfreien Messung von Verformungen in der Materialprüfung.
- Laser-Speckle-Extensometer zur markierungslosen berührungsfreien Messung von Verformungen in der Materialprüfung.

- Laser-Doppler-Anemometer und Particle-Image-Velocimetry zur berührungsfreien Messung der Strömungsgeschwindigkeit von Gasen oder Flüssigkeiten.
- Laser-Lichtschnittsensor zur Messung von Höhenprofilen entlang einer projizierten Linie mithilfe einer Bildverarbeitung.
- Positionsmessung: Positionsermittlung des Laserstrahlschwerpunktes mit Hilfe eines Position Sensitive Device (PSD).
- Laser-Wolkenhöhenmesser in der Meteorologie
- Laserkreisel – Ein optischer Sensor zur Bestimmung der absoluten Winkelgeschwindigkeit (Navigation, Ersatz von mechanischen Kreiselkompassen).

Optik, Geodäsie, Astronomie

Laser dienen zur genauen Ausrichtung optischer Bauteile und astronomischer Instrumente sowie zur Beobachtung von Raumobjekten, unter anderem für

- Justierung optischer Achsen mittels Justierlaser oder Kollimation
- Horizont- und Neigungsmessung mit speziellem Laserpointer oder dem Kanallaser
- Erzeugen horizontaler oder vertikaler Linien mittels Linienlaser
- Zielung mit Laserteleskopen, modernen Laser-Theodoliten und -Zielfernrohren
- Distanzmessungen in der Geodäsie, etwa beim Tachymeter und Lasertracker
- Handgeräte zur Distanzmessung wie den LaserDisto
- Satellite Laser Ranging mittels Laufzeitmessung
- Lunar Laser Ranging
- Astronomische Richtlaser für die Adaptive Optik großer Teleskope (künstlicher Stern).

Wissenschaft

- Laserspektroskopie:
 - Laser werden zur Bestimmung von Energieniveaus in Atomen und Molekülen, zur Dichtemessung in Gasen und Plasmen oder zur Bestimmung von Materialeigenschaften eingesetzt.
 - Laserspektroskopische Verfahren sind beispielsweise die Atomspektroskopie, TDLAS, oder CARS.
- In der Chemie ist durch Infrarot- und Ramanspektroskopie die Identifizierung und Analyse von Molekülen möglich:
 - zeitaufgelöste Spektroskope mit ultrakurzen Laserpulsen im Pikosekunden-Bereich, z. B. zeitlicher Ablauf von chemischen Reaktionen.
- Nichtlineare Optik: z. B. Frequenzkonversion
- In den Biowissenschaften: Durch Laserlicht angeregte Fluoreszenzfarbstoffe und die Benutzung eines Konfokalmikroskops oder eines Zwei-Photonen-Mikroskops ermöglichen es, Zellen und subzelluläre Strukturen mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung im lebenden Gewebe (im Gewebeschnitt oder *in vivo*) zu beobachten.
- In der Zellbiologie als optische Pinzette
- Vermessungen der Erde durch Satelliten, Messung von tektonischen Verschiebungen
- Laserkühlung in Atom- und Ionenfallen
- Plasmaerhitzung in einem Tokamak/Stellarator Fusionsreaktor mittels eines starken Lasers

Holografie

- Als Kunstobjekte
- Zur Datenspeicherung
- Zur Bildspeicherung

Datentechnik

- Datenspeicherung, z. B. CD-ROM, DVD, Blu-ray
- Datenübertragung, z. B. mit Lichtwellenleitern
- Datenfernübertragung, Laser-WLAN, → Optischer Richtfunk
- Laserdrucker
- Laserscanning, das Abtasten zwei- oder dreidimensionaler Oberflächen

Fotolithografie

Mit Lasern können Strukturen im Mikrometer- und Submikrometerbereich auf fotosensitive Materialien geschrieben werden. Mittels mikrofotolithografischer Systeme werden im Direktschreibverfahren hochaufgelöste Vorlagen (Masken) für verschiedene Anwendungen erzeugt, die z. B. mittels breitbandiger Hochleistungslaser in der Produktion auf die endgültigen Materialien umkopiert werden. Andere Anwendungen schließen das Direktschreiben von Strukturen auf Silizium-Wafern in niedrigen Stückzahlen oder das Schreiben von Strukturen auf fotoempfindlichen Filmen (z. B. Dehnungssensoren) ein.

- Bildschirmmasken
- Leiterplatten
- ICs
- Sensoren
- u. v. m.

Militärtechnik

In der Militärtechnik werden Laser zur Kommunikation, zu Messzwecken und als Waffe verwendet.

- Markierung von Zielen für selbststeuernde Waffen und lasergelenkte Bomben.
- Entfernungsmessung mittels einer Lasermesseinheit, z. B. für Panzer und die Artillerie
- Laser als oder an Handgeräten
 - „Lasergewehre“, die den Gegner z. B. erblinden lassen, meist jedoch nur vorübergehend blenden^[11]
 - Laser an Handfeuerwaffen
 - zur Zielmarkierung, beispielsweise bei der AM180
 - zur (Infrarot-)Beleuchtung
 - zur Entfernungsmessung
- Kommunikationsverbindungen in der Atmosphäre, im Weltraum und im Meerwasser
- bodengestützte, auf Flugzeugen (Boeing AL-1) oder Schiffen stationierte Hochenergielaser zur Raketenabwehr (sogenannte *Laserkanonen*). Der Betrieb ist sehr aufwendig, teuer, die Waffen haben eine Gefahrenzone, in der sich beim Betrieb keine Menschen aufhalten dürfen, sie sind wenig effektiv bzw. Raketen können dagegen effizient geschützt werden (→ Tactical High Energy Laser, Energiewaffe)
- Projekte für Lasersatelliten zur Raketenabwehr mittels Hochenergielasern (→ chemische Laser, MIRACL, Röntgenlaser, Weltraumwaffe)

Unterhaltung/Medien

- CD-Spieler, DVD-Spieler, Blu-ray-Disc-Spieler
- Laserpointer
- Disco
- Lasershows (Events)
- Laserharfe
- Planetarien
 - ZULIP, Laservideoprojektor (Rechteckiges Bild), z. B. Planetarium Hamburg
 - ADLIP, kuppelfüllende Projektionstechnik durch Einsatz mehrerer Laservideoprojektoren, z. B. im Planetarium Jena
 - Tridome, kuppelfüllende Projektionstechnik durch Einsatz mehrerer Vektor-Laserprojektoren, z. B. Planetarium Hamburg

Gefahren

Gesundheitsgefahren

Laser können aufgrund der Eigenschaften ihrer Strahlung und aufgrund ihrer extrem konzentrierten elektromagnetischen Leistung biologische Schäden verursachen. Daher sind Laser je nach Laser-Klasse mit genormten Warnhinweisen zu versehen. Dabei werden Bereiche der Wellenlängen und Einwirkzeiten unterschieden, die zu charakteristischen Verletzungen und Verletzungs-Schwellwerten der Leistungs- oder Energiedichte führen.

Anwender und Anlagenbauer müssen direkte, indirekte (unbeabsichtigt gerichtet reflektierte) und Streustrahlung (unbeabsichtigt diffus reflektierte) hinsichtlich dieser Grenzwerte berücksichtigen.

Mögliche Schäden:

- Verbrennungen im Auge: Bereits bei relativ geringen Leistungen (wenige Milliwatt) einer Wellenlänge, für die das Auge transparent ist (etwa 350 bis 1200 nm) treten im ungeschützten Auge partielle Erblindungen durch Netzhautschäden auf, da der parallele Laserstrahl durch die Augenlinse auf der Netzhaut fokussiert wird. Auch Streustrahlung stärkerer Laser dieses Wellenlängenbereiches ist gefährlich. Schäden werden oft nicht bemerkt, sondern erst vom Augenarzt entdeckt.
- Verbrennung von Auge und Haut: Treffen Laserstrahlen oder deren Streustrahlung einer Wellenlänge, für die Haut und Hornhaut nicht transparent sind (ab etwa >1400 nm), auf, kommt es zu oberflächlichen Verbrennungen und Verkohlungen.
- Laserstrahlen im Nahinfrarot-Bereich (um 1000 nm) oder deren Streustrahlung dringt tief unter die Haut vor und kann im Unterhautgewebe schmerzlose, schlecht heilende Verbrennungen verursachen.
- Laser im Ultraviolettbereich verursachen neben den genannten Schäden auch fotochemische Veränderungen des Gewebes. Dazu gehören Erscheinungen ähnlich einem Sonnenbrand mit dem Risiko einer Krebsentstehung sowie Trübungen der Hornhaut, der Augenlinse und des Glaskörpers.
- Bei der medizinischen Anwendung von Lasern kann es zur Entzündung vorhandener oder gebildeter Gase kommen.
- Bei der Lasermaterialbearbeitung entstehen durch Pyrolyse und Verdampfung teilweise hochgiftige Gase, Stäube und Aerosole, die abgesaugt und gefiltert werden müssen.



Die Gefährdung durch Laserstrahlung an Maschinen zur Lasermaterialbearbeitung wird oft nach der Maschinenrichtlinie beurteilt und ergibt auf dem Risikograph meistens die bisherige Kategorie 4 beziehungsweise die Sicherheitsanforderungsstufe 3 (auch Sicherheits-Integritätslevel 3, kurz SIL-3).

Sachschäden

Laserstrahlen können bei ausreichender Leistung oder Fokussierung Brände und Explosionen auslösen. Hochbrillante Laser zur Materialbearbeitung können bei Versagen der Steuerung (zum Beispiel eines Roboters) auch an weit außerhalb ihrer Fokusebene liegenden Bauteilen oder Wandungen Schäden verursachen.

Prävention

Jede kommerzielle Einrichtung, die einen Laser ab der Klasse 3R benutzt, muss von einem Laserschutzbeauftragten auf Gefahren und richtige Verwendung des Lasers unterwiesen werden.

Laser-Klassen

Lasergeräte werden entsprechend der schädlichen biologischen Wirkung von Laserstrahlung in Klassen eingeteilt. Maßgeblich für die nationalen und internationalen Laserklassen ist dabei die Definition von Grenzwerten, bei denen keine Schädigung zu erwarten ist. Neben der amerikanischen ANSI-norm gibt die *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* Grenzwerte im Spektralbereich zwischen 400 und 1400 nm heraus.^[12]

Maßgeblich ist bei nichtionisierender Strahlung die thermische Leistung pro Fläche sowie die spezifischen wellenlängenabhängigen Absorptionseigenschaften des Gewebes (Haut sowie Retina, Hornhaut, Glaskörper und Linse des Auges). Durch die Fokussierung der Augenlinse ist die Gefährlichkeit im sichtbaren und besonders im angrenzenden infraroten Bereich erhöht.

Oberhalb von 1,4 µm Wellenlänge wird die Strahlung großflächig in der Hornhaut absorbiert. Sie bietet einen Schutz für die Retina des Auges. Jedoch reduziert sich die Absorptionstiefe auf weniger als 0,1 mm bei 3 µm Wellenlänge, weshalb es zu Schäden in der Hornhaut kommen kann. Aus diesem Grund heißt der Wellenlängenbereich von 1,5 bis 2 µm *augensicher* (engl. *eye safe*).

Unterhalb 1,4 µm sind Hornhaut, Haut und darunter liegendes Gewebe im Bereich 1200 nm (Nahinfrarot) bis rot (700 nm) teiltransparent, sodass hier tiefreichende Schädigungen auftreten können, deren Entstehung aufgrund dort nicht vorhandenen Wärmeempfindens oft nicht bemerkt werden. Auch Netzhautschäden durch Laser-Strahlung im Nahinfrarot werden oft nicht bemerkt und erst durch für entsprechende Arbeitsplätze vorgesehene ärztliche Augenuntersuchungen entdeckt.

Bei Wellenlängen unterhalb von etwa 400 nm werden organische Molekülbindungen zerstört, die Absorptionstiefe in Gewebe verlagert sich mit kürzerer Wellenlänge an die Oberfläche von Haut und Auge. Es treten auch bei geringen thermischen Leistungsdichten Linsen- und Hornhauttrübungen sowie Schädigungen der Haut vergleichbar einem Sonnenbrand auf. Dementsprechend sind die Grenzwerte der Leistungsdichte bei diesen kurzen Wellenlängen geringer als beispielsweise im mittleren Infrarot.

Die Klasseneinteilung von Lasergeräten und -anlagen erfolgt anhand maximal auftretender Leistungs- bzw. Energiedichten, je nachdem, ob es sich um kontinuierliche oder Puls laser handelt. Dabei ist auch die Expositionsdauer und die Wellenlänge maßgebend.

Klassifizierung nach EN 60825-1

Entsprechend der Gefährlichkeit für den Menschen sind die Laser in Geräteklassen eingeteilt. Die Klassifizierung nach EN 60825-1 erfolgt vom Hersteller. (Die alte Klassifizierung nach DIN VDE 0837 (→ unten) darf für neue Laser nicht mehr verwendet werden)

Klasse	Leistung	Wellenlänge	Beschreibung
1	< 25 μ W	400...700 nm	Die zugängliche Laserstrahlung ist ungefährlich oder der Laser ist in einem geschlossenen Gehäuse
1M	< 25 μ W	302,5...4000 nm	Die zugängliche Laserstrahlung ist ungefährlich, solange keine optischen Instrumente, wie Lupen oder Ferngläser verwendet werden.
2	\leq 1 mW	400...700 nm	Die zugängliche Laserstrahlung liegt nur im sichtbaren Spektralbereich (400 nm bis 700 nm). Sie ist bei kurzzeitiger Bestrahlungsdauer (bis 0,25 s) auch für das Auge ungefährlich.
2M	\leq 1 mW	400...700 nm	Wie Klasse 2, solange keine optischen Instrumente, wie Lupen oder Ferngläser, verwendet werden.
3R	1 bis 5 mW	302,5 nm... 10^6 nm	Die zugängliche Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge.
3B	5 bis 500 mW	302,5... 10^6 nm	Die zugängliche Laserstrahlung ist gefährlich für das Auge und in besonderen Fällen auch für die Haut. Diffuses Streulicht ist in der Regel ungefährlich. (Laser von CD-/DVD-Brennern; Laserstrahlung allerdings nicht direkt zugänglich)
4	> 500mW	302,5... 10^6 nm	Die zugängliche Laserstrahlung ist sehr gefährlich für das Auge und gefährlich für die Haut. Auch diffus gestreute Strahlung kann gefährlich sein. Beim Einsatz dieser Laserstrahlung besteht Brand- oder Explosionsgefahr. (Materialbearbeitung, Forschungslaser)

Anmerkung zu Laserklasse 2 und 2M: Eine wissenschaftliche Untersuchung^[13] ergab, dass der Lidschlussreflex (dieser tritt im übrigen innerhalb 0,25 s auf; eine längere Bestrahlung schädigt das Auge) nur bei < 20 % der Testpersonen gegeben war. Von dem Vorhandensein des Lidschlussreflexes zum Schutz der Augen kann der Studie zufolge nicht als Regelfall ausgegangen werden.

Klassifizierung nach DIN VDE 0837

Bis März 1997 galten in Deutschland die Laserklassen nach DIN VDE 0837. Diese Einteilung ist heute noch in den USA gebräuchlich.

Klasse	Beschreibung
1	entspricht der Klasse 1 nach EN 60825-1
2	entspricht der Klasse 2 nach EN 60825-1 Laser dieser Klasse werden unter Umständen heute in 1M eingestuft.
3a	Die zugängliche Laserstrahlung wird für das Auge gefährlich, wenn der Strahlquerschnitt durch optische Instrumente verkleinert wird. Ist dieses nicht der Fall, ist die ausgesandte Laserstrahlung im sichtbaren Spektralbereich (400 nm bis 700 nm) bei kurzzeitiger Bestrahlungsdauer (bis 0,25 s), in den anderen Spektralbereichen auch bei Langzeitbestrahlung, ungefährlich. Je nach Wellenlänge werden diese Laser heute meistens in Klasse 2M oder 3R eingestuft.
3b	entspricht der Klasse 3B nach EN 60825-1
4	entspricht der Klasse 4 nach EN 60825-1

Siehe auch

- Maser – Das Pendant zum Laser für Mikrowellen
- Superlumineszenz – verstärkte spontane Emission

Literatur

- Ernst Peter Fischer: *Laser - Eine deutsche Erfolgsgeschichte von Einstein bis heute*. Siedler-Verlag 2010, ISBN 978-3-88680-946-2
- Anthony E. Siegman: *Lasers*. University Science Books, Mill Valley/CA 1986, ISBN 0-935702-11-3.
- William T. Silfvast: *Laser Fundamentals*. 2. Auflage. Cambridge University Press, Cambridge 2004, ISBN 0-521-83345-0.
- Fritz Kurt Kneubühl, Markus Werner Sigrist: *Laser*. 6. Auflage. Teubner, Wiesbaden 2005, ISBN 3-8351-0032-7.
- Axel Donges: *Physikalische Grundlagen der Lasertechnik*. Shaker, Aachen 2007, ISBN 978-3-8322-6392-8.
- J. Eichler, H. J. Eichler: *Laser. Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. 5. Auflage. Springer Verlag, ISBN 3-540-00376-2.
- Charles H. Townes: *How the Laser Happened*. Oxford University Press, New York Oxford 1999, ISBN 0-19-512268-2
- Joan Lisa Bromberg: *The Laser in America, 1950-1970*. MIT Press 1991, ISBN 978-0-262-02318-4

Weblinks

- Artikel über Laserlicht und seine physikalischen Hintergründe auf www.naklar.at ^[14]
- Artikel über die Funktion von Lasern aus der MPI Zeitschrift TechMax – pdf ^[15] (376 kB)
- Einstiegsseite zur Laserspezialthematik mit vielen Unterseiten ^[16] auf Welt der Physik
- Interaktive Darstellung des Laserprinzips – Java-Applet ^[17]
- Laserdatenbank und Linksammlung aus dem Bereich Lasertechnik ^[18]
- *Laser* ^[19] in der *Encyclopedia of Laser Physics and Technology* (engl.)
- Englische Sammlung technischer Dokumentationen und Reparaturanleitungen ^[20]
- Nichtkommerzielles deutsches Diskussionsforum rund um Laser und Lasershow Technik ^[21]
- Offizielle Website anlässlich des 50. Jubiläum des Lasers ^[22] von APS,

Einzelnachweise und Fußnoten

- [1] R. G Gould: *The LASER, light amplification by stimulated emission of radiation*. In: *The Ann Arbor Conference on Optical Pumping*. 1959.
- [2] vgl. erste Seite von Goulds Notizblock aus dem Jahr 1957 in der englischen Wikipedia
- [3] Neben der stimulierten Emission, die den Laserprozess erzeugt, gibt es auch die sog. spontane Emission, die zufällig und daher - im Gegensatz zur stimulierten Emission - für den Laserprozess nicht nur *nicht wesentlich*, sondern sogar *schädlich* ist. Da sie mit der dritten Potenz der Frequenz ν anwächst, spielt sie bei sehr niedrigen Energien keine Rolle, während sie die Erzeugung von Lasern mit hoher Frequenz, z. B. im Röntgenbereich, zumindest stark behindert.
- [4] F. K. Kneubühl, M. W. Sigrist: *Laser*. 3. Auflage. Teubner, 1991, S. 4.
- [5] T. H. Maiman: *Stimulated Optical Radiation in Ruby*. In: *Nature*. **187** 4736, 1960, S. 493–494.
- [6] A. Javan, W. R. Bennet, D. R. Herriot: *Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He-Ne Mixture*. In: *Phys. Rev. Lett.* 6, 106–110, 1961
- [7] J. Eichler, H. J. Eichler: *Laser. Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. 7. Auflage. Springer Verlag, S. 160
- [8] Dr. Rüdiger Paschotta: *Ring Lasers* (http://www.rp-photonics.com/ring_lasers.html). In: *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. RP Photonics Consulting GmbH, abgerufen am 26. April 2010 (Englisch).
- [9] *Laser - Bauformen, Strahlführung, Anwendungen* 7. Auflage, Springer-Verlag
- [10] Liebscher, Jens. *Beidseitig gleichzeitiges Laserstrahlschweißen von großformatigen 3D-Luftfahrtstrukturen* (<http://www.iws.fraunhofer.de/branchen/bra03/bra03-05.pdf>), Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS), Dresden, Dezember 2005.
- [11] <http://www.alfalight.com/nlod.aspx> grüner Blendlaser
- [12] *Revision of Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths between 400 nm and 1.4 mm* (<http://www.icnirp.de/documents/laser400nm+.pdf>). *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*, 30. März 2000, abgerufen am 28. Dezember

2009 (Englisch).

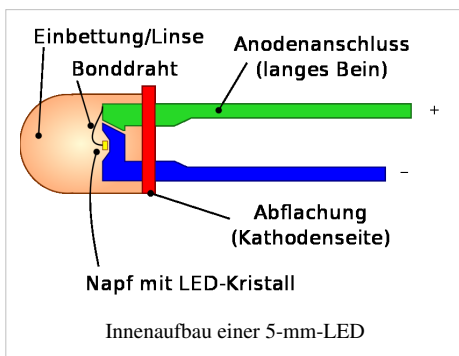
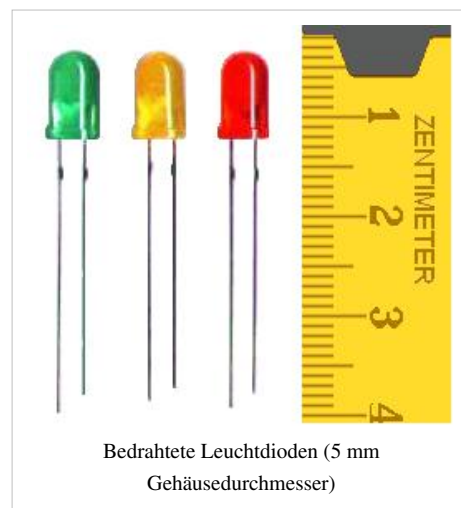
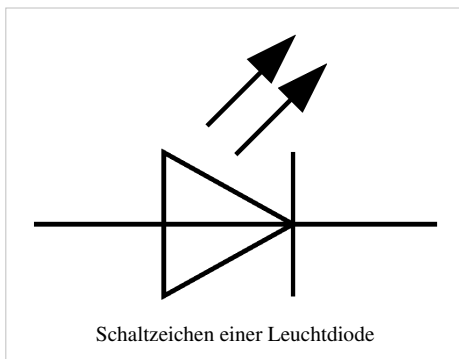
- [13] Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Hofmann, J.: *Überprüfung der Laserklassifizierung unter Berücksichtigung des Lidschlussreflexes*. In: *Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin*. Fb 985, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven 2003, ISBN 978-3897019683.

Zusammenfassung in Abwendungsreaktionen des Menschen gegenüber sichtbarer Laserstrahlung (<http://www.verwaltung.fh-koeln.de/imperia/md/content/verwaltung/dezernat5/sg52/forschung/forschungsbericht/foslaser.pdf>).

- [14] <http://www.naklar.at/content/features/laser/>
 [15] http://www.mpg.de/bilderBerichteDokumente/multimedial/techmax/heft2006_06/pdf.pdf
 [16] <http://www.weltderphysik.de/de/3786.php>
 [17] <http://www.activeart.de/dim-shops/demo/laserPrinzip>
 [18] <http://www.laser.alhin.de/>
 [19] <http://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>
 [20] <http://laserfaq.org>
 [21] <http://laserfreak.net>
 [22] <http://www.laserfest.org>

Leuchtdiode

Eine **Leuchtdiode** (auch *Lumineszenz-Diode*, kurz **LED** für *Light Emitting Diode* beziehungsweise *lichtemittierende Diode*) ist ein elektronisches Halbleiter-Bauelement. Fließt durch die Diode Strom in Durchlassrichtung, so strahlt sie Licht, Infrarotstrahlung (als Infrarotleuchtdiode) oder auch Ultraviolettstrahlung mit einer vom Halbleitermaterial und der Dotierung abhängigen Wellenlänge ab.



Das Bild rechts zeigt den Aufbau einer bedrahteten Leuchtdiode. Der Halbleiterkristall ist in einer Reflektorwanne eingebettet. Das Bild auf der rechten Seite zeigt den Reflektor vor Anbringung der transparenten Kunststoffummantelung. Der rechteckige Draht, der den Reflektor trägt, stellt bei den meisten LEDs den Kontakt zur Kathode her und nimmt die Verlustwärme auf. In der Mitte des Kristalls erkennt man Reste des Bonddrahts, der den Kontakt zur Anode herstellt.

Im linken Bild ist der Bonddraht rechts oberhalb des Trägers als horizontale Linie erkennbar. Die Kathode (–) ist durch eine Abflachung rechts am Gehäusesockel markiert. Bei fabrikneuen LEDs ist zudem der Anschluss der Kathode kürzer (Merkregel: Kathode = kurz = Kante). Bei den meisten LEDs ist der Reflektor die Kathode, dann gilt auch die Merkregel, dass die (technische) Stromrichtung von dem Pfeil, den die Anode (+) durch ihre Form bildet, „angezeigt“ wird. In seltenen Fällen ist der Aufbau umgekehrt.

Hochleistungs-LEDs (H-LED) werden mit höheren Strömen als 20 Milliampere betrieben. Es entstehen besondere Anforderungen an die Wärmeableitung, die sich in speziellen Bauformen ausdrücken. Die Wärme kann über die Stromzuleitungen, die Reflektorwanne oder in den LED-Körper eingearbeitete Wärmeleiter abgeführt werden.

Die industrielle Verarbeitung von bedrahteten LEDs gilt, wie bei allen bedrahteten Bauteilen in heutigen, vorwiegend automatisierten Platinenfertigungsprozessen, als zu aufwändig. Daher werden LEDs von den führenden Herstellern hauptsächlich in SMD-Gehäuseform hergestellt. Zudem ist die höchste Bandbreite der Lichtfarben nur noch bei SMD-Bauteilen erhältlich. Bedrahtete LEDs werden weiterhin hergestellt, vor allem die Bauformen 3 mm mit Linse und 5 mm mit Linse. Diese Bauteile werden vorzugsweise von Hobbyelektronikern, bei Mini-Taschenlampen und von Bastlern eingesetzt, wenn ohnehin keine Platine vorgesehen ist. „Superflux“ oder auch „Spider-LEDs“ genannt, sind eine weitere Bauform. Die vier Kontaktfüße (Pins) ermöglichen nicht nur eine bessere Wärmeableitung und somit eine hohe Lebensdauer, sondern sie können auch getrennt angesteuert werden ^[1].

Eine weitere Möglichkeit ist das direkte „Bonden“ des LED-Chips auf der Platine (*chip on board*) und der spätere Verguss mit Silikonmassen. Diese Bauform findet bei Displays mit sehr vielen LEDs Verwendung.



Makroaufnahme einer Leuchtdiode (Durchmesser 5 mm).



Innerer Reflektor (Durchmesser ca. 1,8 mm), ohne Kunststoffummantelung.

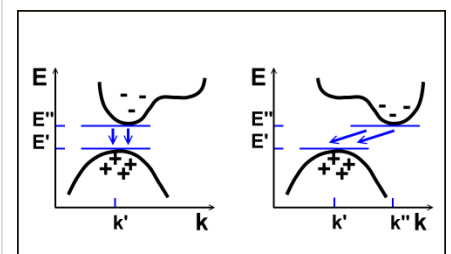
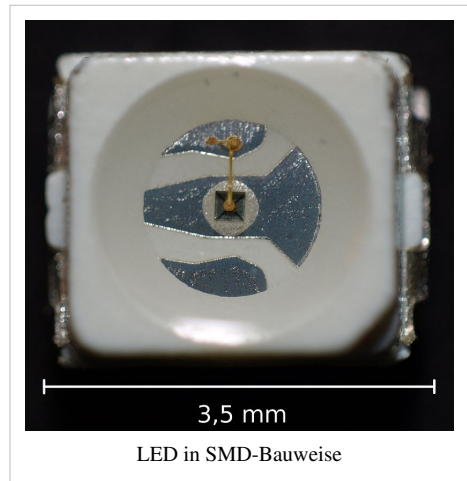
Mehrfarbige Leuchtdioden bestehen aus mehreren (zwei oder drei) Dioden in einem Gehäuse. Meist haben sie eine gemeinsame Anode oder Kathode und einen Anschluss für jede Farbe. Bei einer Ausführung mit zwei Anschlüssen sind zwei LED-Chips antiparallel geschaltet. Je nach Polarität leuchtet die eine oder andere Diode. Eine quasi stufenlose Farbveränderung kann man über ein variables Pulsbreitenverhältnis eines geeigneten Wechselstroms realisieren.

Funktionsprinzip

Der prinzipielle Aufbau einer LED entspricht dem einer pn-Halbleiterdiode, LEDs besitzen daher die gleichen Grundeigenschaften wie diese. Ein großer Unterschied besteht in dem verwendeten Halbleitermaterial. Während nichtleuchtende Dioden aus Silizium, seltener aus Germanium oder Selen hergestellt sind, ist das Ausgangsmaterial für LEDs ein sogenannter III-V-Halbleiter, meist eine Galliumverbindung.

Wird eine Spannung in Durchlassrichtung angelegt, wandern Elektronen zur Rekombinationsschicht am p-n-Übergang. Auf der n-dotierten Seite bevölkern sie das Leitungsband, um nach Überschreiten der Grenzfläche auf das energetisch günstigere p-dotierte Valenzband zu wechseln. Sie rekombinieren mit den dort vorhandenen Löchern. III-V-Halbleiter zeichnen sich dabei durch einen *direkten Bandübergang* aus, das bedeutet, dass die Elektronen auf direktem Wege vom Leitungsband in das Valenzband wechseln können. Bei diesem Übergang kann Licht ausgesendet werden. Ein weiterer Ursprung von Photonen besteht in einer plasmonisch-polaronischen Wechselwirkung, die durch einen spinfreien Übergang direkt zur Emission eines Auger-Photoelektrons führt. Dieser Mechanismus spielt insbesondere bei exzitoner Emission in grünen Galliumphosphid-Leuchtdioden eine Rolle. Bei *indirekten Halbleitern* wie Silizium erfolgt der Wechsel der Elektronen vom Leitungs- in das Valenzband hingegen indirekt, der Impuls der Elektronen wird durch das Kristallgitter aufgenommen und verursacht eine Gitterschwingung (Phononenanregung). Dadurch steht keine Energie für die Aussendung von Licht zur Verfügung.

Die Bandstruktur des Halbleiters bestimmt also das Verhalten der Energieübertragung. Im Unterschied zum sehr vereinfachten Bändermodell ist in der Grafik rechts horizontal der Wellenvektor \vec{k} aufgetragen, anschaulich vergleichbar einer reziproken Ortskoordinate. Rechts ist kein direkter Strahlungsübergang vom oberen Leitungsband auf das untere Valenzband möglich, da sich nicht nur die Energie, sondern auch der Impuls \vec{k} verändert, im Gegensatz zum linken Beispiel (siehe auch Bandlücke).



Bandstrukturen zweier Halbleiter
links: direkter Halbleiter (z. B. Galliumarsenid)
rechts: indirekter Halbleiter (z. B. Silizium)

$$\lambda(W_D) = \frac{h \cdot c}{W_D} \quad \text{mit} \quad W_D = E'' - E'$$

als Zahlenwertgleichung:

$$\lambda(W_D) = \frac{1240 \text{ nm eV}}{W_D}$$

$\lambda(W_D)$: Wellenlänge des emittierten Lichtes. (Für die Zahlenwertgleichung in nm, wenn W_D in eV eingesetzt wird.)

h : Plancksches Wirkungsquantum = $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ = $4,13567 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$

c : Lichtgeschwindigkeit = $2,99792458 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$

W_D : Arbeit, hier: Bandlücke (Für Zahlenwertgleichung angegeben in eV), abhängig vom verwendeten Halbleiterwerkstoff.

Die Größe der Energielücke $E'' - E'$ bestimmt die Farbe des ausgesandten Lichtes. Sie lässt sich über die chemische Zusammensetzung des Halbleiters steuern. Beispielsweise hat der Halbleiter Galliumarsenid einen direkten Bandabstand von 1,4 eV, entsprechend einer Wellenlänge von 885 nm, entsprechend infrarotem Licht. Eine Zugabe von Phosphor vergrößert ihn, dadurch wird auch das ausgesendete Licht energiereicher, die Wellenlänge nimmt ab, die Farbe geht von Infrarot zu Rot und Gelb über.

Durch die Zunahme von Phosphor im Kristall verformt sich jedoch auch das Leitungsband. Wenn Phosphor 50 % der Arsen-Atome ersetzt, liegt der Bandabstand zwar bei fast 2 eV, was einer Strahlung von 650 nm (Rot) entspricht, dafür hat sich die Bandstruktur so verschoben, dass keine direkten Strahlungsübergänge mehr beobachtet werden, wie im Beispiel rechts gezeigt.

Eigenschaften

Spektrale Charakteristik

Anders als Glühlampen sind Leuchtdioden keine thermischen Strahler. Sie emittieren Licht in einem begrenzten Spektralbereich, das Licht ist nahezu monochrom. Deshalb sind sie beim Einsatz als Signallicht besonders effizient im Vergleich zu anderen Lichtquellen, bei denen zur Erzielung einer monochromen Farbcharakteristik Farbfilter den größten Teil des Spektrums herausfiltern müssen.

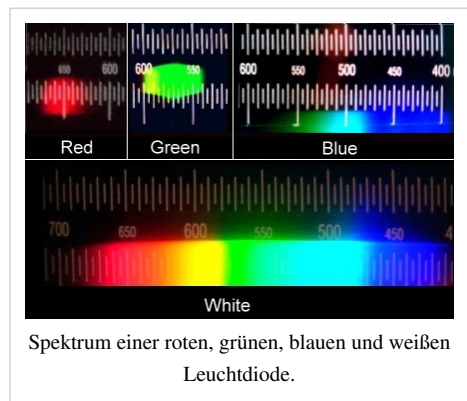
Lange Zeit konnten LEDs nicht für alle Farben des sichtbaren Spektrums hergestellt werden. Der Einsatz grüner LEDs war für Verkehrsampeln wegen der fehlenden Technologie für die geforderte blaugrüne Lichtfarbe nicht möglich. Blaue LEDs gibt es erst seit etwa 20 Jahren.

Das Licht weißer LEDs wird erreicht, indem vor blaue LEDs farbtönende Leuchtstoffe montiert werden. Sie besitzen neben dem breiten Spektralbereich des Leuchtstoffes daher einen schmalbandigen blauen Lichtanteil.

Elektrische Eigenschaften

Leuchtdioden besitzen eine exponentiell ansteigende Strom-Spannungs-Kennlinie (siehe unten), die unter anderem auch von der Temperatur abhängt. Der Lichtstrom ist nahezu proportional zum Betriebsstrom. Die Flussspannung stellt sich durch Betrieb an Konstantstrom ein, besitzt Exemplarstreuungen und ist temperaturabhängig – sie sinkt mit steigender Temperatur wie bei allen Halbleiterdioden ab. Die Versorgung über eine Konstantstromquelle (häufig in Form eines Vorwiderstandes) ist daher zwingend. Direkter Betrieb an einer Spannungsquelle ist nicht möglich, da der Arbeitspunkt nicht ausreichend genau eingestellt werden kann. Manche Batterie-Leuchten betreiben LEDs direkt an Primärzellen – hier verlässt man sich auf einen ausreichend hohen Innenwiderstand der beigelegten Batterien.

Die maximal zulässige Stromaufnahme von LEDs reicht von 2 mA (beispielsweise bei miniaturisierten SMD-LEDs oder Low-current-LEDs) über 20 mA (Standard-LEDs) bis über 18 A (Stand Juni 2008) bei Hochleistungs-LEDs.



Die Flussspannung V_f (für englisch *forward voltage*) hängt von der Lichtfarbe ab und liegt zwischen 1,3 V (Infrarot-LED) und etwa 4 V (InGaN-LED, grün, blau, weiß, Ultraviolett^[2]). Die maximal zulässige Sperrspannung beträgt in der Regel nur 5 Volt.

LEDs lassen sich über den Betriebsstrom sehr schnell schalten und modulieren. Die hohe Modulationsgeschwindigkeit von LEDs ist beim Einsatz in der Optoelektronik (Optokoppler, Datenübertragung über Lichtleiter bzw. Kabel aus Kunststoffen oder Glasfasern sowie Freifeld-Infrarotstrahlung) wichtig. LEDs können bis weit über 100 MHz moduliert werden.

Richtungsabhängigkeit der Strahlungsleistung

Leuchtdioden werden meist mit Polymeren verpackt. Bei lichtstarken LEDs kommen auch Glas- oder Metallgehäuse zum Einsatz. Metallgehäuse, meistens aus Aluminium, dienen hauptsächlich zur Wärmeableitung. Der Kunststoffkörper ist oft wie eine Linse geformt und liegt über dem Kristall. Er setzt den Grenzwinkel der Totalreflexion herab und bündelt somit die austretende Strahlungsleistung auf einen kleineren, bestimmaren Raumwinkel. Da Glas in der Regel eine höhere Brechzahl als Kunststoff und Kunstharz besitzt, kann durch den Einsatz von Glaslinsen die Strahlung der LED noch stärker gebündelt werden. Das nicht entspiegelte Glas besitzt jedoch höhere Reflexionsverluste von etwa 10 %, auch weil es den Kristall nicht direkt berührt.

Ein wichtiger Parameter einer LED ist der *Öffnungswinkel*.

Strahlungsleistung gegenüber Öffnungswinkel

Öffnungswinkel	180°	170°	160°	150°	140°	130°	120°	110°	100°	95°	90°	85°	80°	75°	70°
sr-Faktor	6,2832	5,7356	5,1921	4,6570	4,1342	3,6278	3,1416	2,6793	2,2444	2,0383	1,8403	1,6507	1,4700	1,2984	1,1363
Öffnungswinkel	65,55°	60°	55°	50°	45°	40°	35°	30°	25°	20°	15°	10°	5°	1°	
sr-Faktor	1,0003	0,8418	0,7099	0,5887	0,4783	0,3789	0,2908	0,2141	0,1489	0,0955	0,0538	0,0239	0,0060	0,00024	

Durch den begrenzten Öffnungswinkel bestrahlt eine LED anders als eine Glühlampe nur eine Teilfläche (bezogen auf die Oberfläche einer Kugel mit der Strahlungsquelle im Zentrum). Für 360°-Beleuchtungen mit Leuchtdioden sind mehrere Leuchtdioden notwendig. Um zu ermitteln, wie viele Leuchtdioden benötigt werden, kann folgende von der Kugelkalotte abgeleitete Gleichung genutzt werden.

$$\text{Anzahl} = \left\lceil \frac{2}{1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right\rceil$$

Beispiel: Um eine starke 360°-Lampe mit einer Farbtemperatur von ungefähr 5000 K mit Leuchtdioden (Parameter: 55° Öffnungswinkel, 3,15 W Leistungsaufnahme und 160 lm \approx 50 lm/W) zu realisieren, sind 18 Leuchtdioden notwendig (eine LED mit 55° Öffnungswinkel beleuchtet ungefähr ein Achtzehntel einer Kugel). Bei entsprechender Anordnung der LEDs (beispielsweise an einer Drahtgitterkugel) erhält man so einen Leuchtkörper mit 2880 Lumen, der eine Leistungsaufnahme von 54 Watt besitzt. Dieser Lichtstrom ist vergleichbar mit dem einer 300-Watt-Glühlampe.

Alterung

Als Lebensdauer (Licht-Degradation) einer LED wird die Zeit bezeichnet, nach der die Lichtausbeute auf die Hälfte des Anfangswertes abgesunken ist. Leuchtdioden werden nach und nach schwächer, fallen aber in der Regel nicht plötzlich aus. Die Lebensdauer hängt vom jeweiligen Halbleitermaterial und den Betriebsbedingungen (Wärme, Strom) ab. Hohe Temperaturen (gewöhnlich durch hohe Ströme) verkürzen die Lebensdauer von LEDs drastisch. Die angegebene Lebensdauer reicht von einigen tausend Stunden bei älteren 5-Watt-LEDs bis zu über 100.000 Stunden bei mit niedrigen Strömen betriebenen LEDs. Aktuelle Hochleistungs-LEDs werden, um eine maximale Lichtausbeute zu erreichen, oft an Arbeitspunkten betrieben, bei denen ihre Lebensdauer bei 15.000 bis 30.000 Stunden liegt. Die von den Herstellern angegebene Leuchtdauer bezieht sich in der Regel auf die Anzahl der Betriebsstunden, bis die Leuchte noch mit 70% der ursprünglichen Leuchtkraft arbeitet. Auch im Handel erhältliche LED-Leuchtmittel in Glühlampenform erreichen über 25.000 Stunden bis hin zu 45.000 Stunden Lebenszeit. [3] [4] [5]

Die Alterung von LEDs ist in erster Linie auf die Vergrößerung von Fehlstellen im Kristall durch thermische Einflüsse zurückzuführen. Diese Bereiche nehmen nicht mehr an der Lichterzeugung teil. Es entstehen strahlungslose Übergänge. Bei GaN-LEDs im blauen und Ultraviolett-Bereich ist auch eine Alterung der Kunststoffgehäuse durch das kurzwellige Licht mit einhergehender Trübung feststellbar. Bei diesen und weißen LEDs mit hoher Leistung wird deshalb der lichtdurchlässige Teil des Gehäuses manchmal aus Silikongummi gefertigt, wodurch eine Lebensdauer von 100.000 Stunden erzielt wird, was etwa 11,5 Jahren Dauerbetrieb entspricht.

Eine weitere Ursache kann eine Fehlfunktion auf Grund von Alterungsvorgängen in den verwendeten Materialien sein. Zum Beispiel Ermüdungserscheinungen von Klebe- oder Bodenverbindungen.

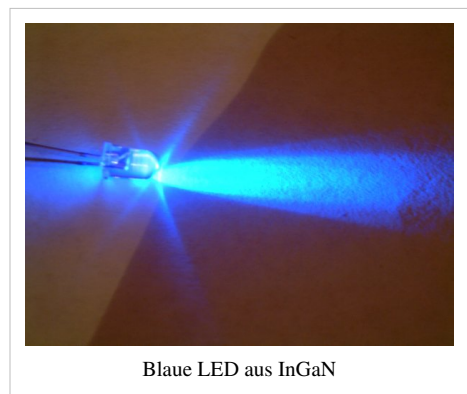
Diese Fehlfunktionen werden unter dem Begriff *Mortality (B)* oder *Totalausfall* beschrieben. Steht im Datenblatt einer LED *B50 bei 100.000 Std.*, bedeutet dies, dass 50 % aller Testlampen nach 100.000 Std. durch Defekt ausgefallen sind. Manchmal wird auch der B10-Wert, d. h. die Zeitdauer, nach der 10 % der Testlampen nicht mehr funktionieren, angegeben.

Farben und Technologie

Durch die gezielte Auswahl der Halbleitermaterialien und der Dotierung können die Eigenschaften des erzeugten Lichtes variiert werden. Vor allem der Spektralbereich und die Effizienz lassen sich so beeinflussen:

- Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) – rot (665 nm) und infrarot bis 1000 nm Wellenlänge
- Galliumarsenidphosphid (GaAsP) und Aluminiumindiumgalliumphosphid (AlInGaP) – rot, orange und gelb
- Galliumphosphid (GaP) – grün
- Siliziumkarbid (SiC) – erste kommerzielle blaue LED; geringe Effizienz
- Zinkselenid (ZnSe) – blauer Emitter, der jedoch nie die kommerzielle Reife erreichte
- Indiumgalliumnitrid (InGaN)/Galliumnitrid (GaN) – Ultraviolett, Violett, blau und grün
- Weiße LEDs sind meistens blaue LEDs mit einer davor befindlichen Fluoreszenz-Schicht, die als Wellenlängen-Konverter wirkt (siehe Abschnitt Weiße LED)

Bei der Herstellung der LED-Halbleiter werden verschiedene Epitaxie-Verfahren eingesetzt. Die Halbleiter werden zum Schutz in transparenten Kunststoff eingegossen.



Blaue LED aus InGaN

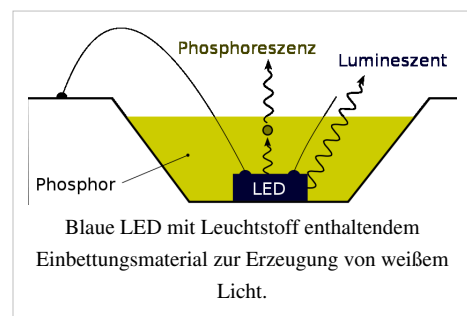
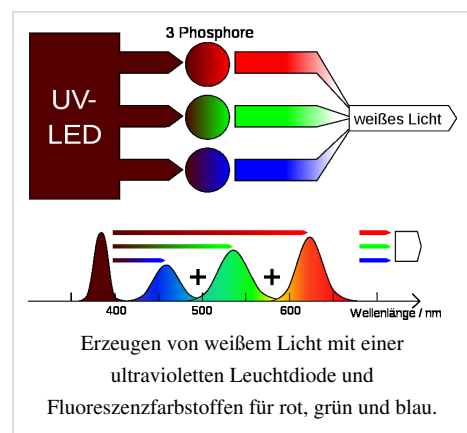
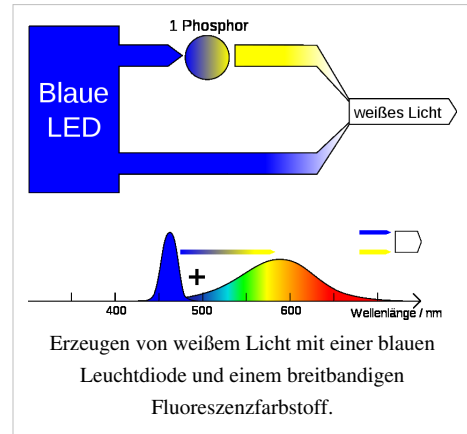
Weißes LED

Um mit Leuchtdioden weißes Licht zu erzeugen, kommen verschiedene Verfahren zur additiven Farbmischung zum Einsatz:

- Verschiedene Chips (selten verwendet): Leuchtdioden verschiedener Farben, oft Blau und Gelb (in zwei LEDs) oder Rot, Grün und Blau (RGB), werden so kombiniert, dass sich ihr Licht gut mischt und damit als weiß erscheint. Zur besseren Lichtmischung sind meist zusätzliche optische Komponenten erforderlich. Es ist daher vorteilhaft, die LEDs räumlich nahe beieinander zu platzieren. Aus praktischen Gründen werden die verschiedenfarbigen LED-Chips oft in einem Bauteil integriert.
- Lumineszenz (die weiße Standard-LED): Eine blaue oder UV-LED wird mit photolumineszierendem Material (Fluoreszenzfarbstoff, Leuchtstoff) kombiniert. Ähnlich wie auch in Leuchtstoffröhren kann so kurzwelliges, höher energetisches Licht (blaues Licht und Ultraviolettstrahlung) in langwelliges, niedriger energetisches Licht umgewandelt werden. Die Wahl der Leuchtstoffe kann variieren. Seltener wird eine UV-LED mit mehreren verschiedenen Leuchtstoffen (rot, grün und blau) - häufiger eine blaue LED mit nur einem einzigen Leuchtstoff (gelb, meistens Cer-dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat) kombiniert. So gefertigte Bauteile verfügen über gute Farbwiedergabeeigenschaften (Farbwiedergabeindex $R_a \approx 90$). Die Verwendung mehrerer Farbstoffe verteuert allerdings den Herstellungsprozess und reduziert die Lichtausbeute.

Für Beleuchtungszwecke wird aus Kostengründen fast immer die Variante mit einer blauen Leuchtdiode in Kombination mit Leuchtstoffen verwendet. So aufgebaute weiße LEDs bestehen aus einer blauen LED mit einer darüberliegenden gelblich fluoreszierenden Schicht aus Cer-dotiertem Yttrium-Aluminium-Granat-Pulver. Da blaue LEDs den höchsten Wirkungsgrad haben (UV-LEDs hingegen weniger als die Hälfte) und der Blauanteil sichtbar ist, ist das die wirtschaftlichste Methode, weißes Licht per LED zu erzeugen. Der Ultraviolett-Anteil, den blaue LEDs am kurzwelligen Ausläufer ihres Strahlungsspektrums aussenden, wird durch die Fluoreszenzschicht ebenfalls weitgehend in gelbliches Licht umgewandelt.

Bei dem gängigsten Herstellungsverfahren für weiße LEDs wird Galliumnitrid auf eine Grundschrift aus Saphir gedampft, dann wieder abgelöst und erneut bedampft. So entsteht die erste Schicht des GaN-Halbleiterkristalls. In einem neuen Verfahren^[6] wird die teure Saphirschicht durch Silizium ersetzt. Eine Beschichtung aus Zirkonnitrid verhindert dabei, dass die Siliziumschicht Licht absorbiert. Die Verwendung von Zirkonnitrid wurde erst ermöglicht,



indem man das Silizium zuvor mit einer Zwischenschicht aus Aluminiumnitrid überzog, um die Reaktion des Siliziums mit dem Zirkonnitrid zu verhindern. Als letzte Schicht wird das Galliumnitrid aufgedampft. Durch dieses Verfahren können die wesentlich günstigeren und großflächigen Siliziumscheiben zur LED-Herstellung verwendet werden.

Die Art der Leuchtstoffbeschichtung ist dabei für die Qualität entscheidend. Wie man anhand obiger Grafik in der rechten Hälfte deutlich sehen kann, erzeugt die im Mittel gelblich leuchtende Fluoreszenzschicht ein sehr breitbandiges Licht, was zu einem ausgeglichenen Spektrum führt. Andererseits ist die Überlappung mit den Spektren der meisten roten Farbstoffe nur schlecht, was die Farbwiedergabe beeinträchtigt und beispielsweise in Farb-LCDs, die mit solchen weißen LED hinterleuchtet sind, zu einer schlechten Rotwiedergabe führt.

RGB-LEDs hingegen (in der linken Hälfte der Grafik wiedergegeben) erzeugen drei relative schmale Peaks im Spektrum, was für Licht in drei engen Frequenzbändern steht. Trotz zu erwartender Probleme mit schmalbandigen Farbstoffen ist deren Farbwiedergabe im allgemeinen besser, was sich vor allem bei der Hinterleuchtung von Farb-LCDs in brillanten Farben bemerkbar macht – die Durchlasswellenlängen der Farbfilter der einzelnen einfarbigen Pixel des LCDs können an die Emissionsmaxima der Leuchtstoffe angepasst werden. Unterschiedliche Leuchtstoff-Schichtdicken führen allerdings besonders am Rand zu einer inhomogenen, von der Abstrahlrichtung abhängigen Lichtfarbe.

Weißer LEDs werden wie Leuchtstofflampen auch für unterschiedliche Arten (Farbtemperaturen) weißen Lichtes gefertigt. Übliche Kategorien sind das „kaltweiße“, tageslichtähnliche Licht (Farbtemperatur 5500–6000 K) und das „warmweiße“ Licht, ähnlich dem von Glühlampen (2700–3000 K).

Pastelltöne

Aufgrund der möglichen Verwendung in der Unterhaltungselektronik, speziell für die Tastaturbeleuchtung von Mobiltelefonen und anderen Trend-Produkten, geht man inzwischen auch dazu über, insbesondere SMD-LEDs in Pastelltönen zu produzieren. Dazu wird im wesentlichen wie bei weißen LEDs vorgegangen, nur dass die Fluoreszenzschicht, die über den blau leuchtenden LED-Chip gelegt wird, nicht gelblich, sondern rötlich ist, wodurch dann Rosa („pink“) erzeugt wird. Um ein Pastellblau zu erzeugen, muss man nur die gelbliche Schicht etwas dünner machen als bei weißen LEDs, so dass ein höherer Blauanteil durchdringt. Da auch grüne LEDs mittlerweile zu den sehr wirtschaftlichen gehören, ist das gleiche auch mit grünen Chips möglich. Da nur Licht hoher Frequenz einen fluoreszierenden Stoff niedrigerer Frequenz zum Leuchten anregen kann, dies folgt aus der Stokesverschiebung, ist es nicht möglich, mit einer roten LED einen blau fluoreszierenden Stoff anzuregen, umgekehrt aber schon. Deswegen können für pastellfarbene LEDs praktisch nur Chips in den „Farben“ UV und Blau verwendet werden.







Klasseneinteilung

In vielen Einsatzbereichen werden durch Normen genau definierte Lichtfarben vorgegeben. Bedingt durch den Herstellungsprozess können bei LEDs eines Types und Herstellers Farbunterschiede im direkten Vergleich auffallen. Generell geben alle LED-Hersteller Bereiche an, in denen ihre Produkte streuen. Das Einteilen in verschieden fein abgestufte Klassen wird als *binning* (deutsch: *Klasseneinteilung*) bezeichnet. Bei weißen LEDs umfasst dieses hauptsächlich den sogenannten „Flux bin“, die Schwellenspannung, die Lichtausbeute sowie den Bereich, in dem der mehr oder weniger ausgeprägte Farbstich liegt. Bezüglich der Farblage wird nicht nur unterschieden, in welchem Bereich der Farbmischung (tendenziell mehr rot oder grün oder blau) sie liegt, sondern welche Farbtemperatur das Licht der LED bei Nennstrom aufweist. Auch farbige LEDs werden mit selektierten spektralen Toleranzen angeboten. Informationen darüber, welchem „Bin“ (Selektionsgrad) welche Eigenschaften zugewiesen sind, kann man den Datenblättern der Hersteller entnehmen.

Flussspannung

Die Farbe einer Leuchtdiode hängt wesentlich vom Bandabstand des eingesetzten Halbleitermaterials ab. Die Farbe entspricht direkt einer bestimmten Wellenlänge λ bzw. dem Kehrwert der Frequenz der emittierten elektromagnetischen Strahlung. Die sich daraus ergebende Flussspannung bei Nennstrom, auch *Durchlassspannung* oder *Vorwärtsspannung* (englisch *forward voltage*) ist dann je nach Farbe unterschiedlich.

Flussspannungen von LEDs verschiedener Farben

Farbe	Wellenlänge λ in nm	Flussspannung ΔU in V	Werkstoff
Infrarot	$\lambda > 760$	$\Delta U < 1,9$	Galliumarsenid (GaAs) Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs)
 Rot	$610 < \lambda < 760$	$1,63 < \Delta U < 2,1$	Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) Galliumarsenidphosphid (GaAsP) Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP) Galliumphosphid (GaP)
 Orange	$590 < \lambda < 610$	$2 < \Delta U < 2,1$	Galliumarsenidphosphid (GaAsP) Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP) Galliumphosphid (GaP)
 Gelb	$570 < \lambda < 590$	$2,1 < \Delta U < 2,2$	Galliumarsenidphosphid (GaAsP) Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP) Galliumphosphid (GaP)
 Grün	$500 < \lambda < 570$	$2 < \Delta U < 3,4$	Indiumgalliumnitrid (InGaN) / Galliumnitrid (GaN) Galliumphosphid (GaP) Aluminiumgalliumindiumphosphid (AlGaInP) Aluminiumgalliumphosphid (AlGaP) Zinkoxid (ZnO), in Entwicklung
 Blau	$450 < \lambda < 500$	$2,48 < \Delta U < 3,7$	Zinkselenid (ZnSe) Indiumgalliumnitrid (InGaN) Siliziumkarbid (SiC) Silizium (Si) als Träger, in Entwicklung Zinkoxid (ZnO), in Entwicklung
 Violett	$400 < \lambda < 450$	$2,76 < \Delta U < 4,0$	Indiumgalliumnitrid (InGaN)
Ultraviolett	$230 < \lambda < 400$	$3,1 < \Delta U < 4,4$	Diamant (C) Aluminiumnitrid (AlN) Aluminiumgalliumnitrid (AlGaN) Aluminiumgalliumindiumnitrid (AlGaInN) ^[7]

Flussspannungen nicht leuchtender Halbleiterdioden

Diode	Flussspannung ΔU in V
Schottky-Diode aus Silizium	$0,2 < \Delta U < 0,5$
Silizium-Diode mit p-n-Übergang	$0,6 < \Delta U < 1$
Germaniumdiode mit p-n-Übergang	$0,2 < \Delta U < 0,4$

Einsatzbereiche

Der Anwendungsbereich von LEDs umfasste zunächst aufgrund geringer Lichtausbeute und fehlender Verfügbarkeit aller Farben hauptsächlich Anzeigeelemente wie beispielsweise Statusanzeigen. Sie ersetzen dabei kleinere Glühlampen oder Glimmlampen. Dieser Anwendungsbereich umfasst auch Anzeigen wie beispielsweise die Siebensegmentanzeigen oder Matrixanzeigen in welchem sie spezielle Elektronenröhren wie die Nixie-Röhre ablöste. Zeitgleich ergaben sich Anwendungen zur Signalübertragung, wo die Leuchtdiode in ihrer Funktion nicht unbedingt für den Benutzer optisch sichtbar ist und wo Leuchtdioden bis heute dominierend sind. Beispiele dafür sind infrarote LEDs in Infrarotfernsteuerungen, in Lichtschranken oder in Optokopplern zur galvanischen Trennung von elektrischen Stromkreisen.

Ein weiterer davon abzugrenzender Anwendungsbereich liegt im Bereich der Beleuchtung und dem Einsatz als Leuchtmittel. Neben der Raumbeleuchtung oder Straßenbeleuchtung kommen LEDs auch zunehmend in Taschenlampen und bei der Effektbeleuchtung vor. Auch Signalisierungen wie bei Verkehrsampeln lassen sich mit LEDs verwirklichen. Verwandte Anwendungen bei Wechselverkehrszeichen oder Lane-Lights (in den Boden eingebauten Blinkleuchten) funktionieren aber überhaupt nur mit LEDs aufgrund der Möglichkeit zur optischen Darstellung von im Straßenverkehr üblichen Symbolen. Die Verkehrstelematik steigert dadurch z. B. Verkehrsdurchfluss oder Verkehrssicherheit.

Nutzungen mit höheren Lichtströmen wie als Rücklicht oder als Kennleuchten auf Fahrzeugen fallen auch in diesen Bereich. Dabei werden die zuvor eingesetzten Glühlampen oder Gasentladungslampen durch Leuchtdioden ersetzt. Dieser Anwendungsbereich wurde erst durch die Verfügbarkeit von Hochleistungs-LED mit entsprechender Lichtausbeute und der Verfügbarkeit in allen Farben möglich.

Daneben existieren noch spezielle Einsatzbereiche, welche die spektralen Eigenschaften der eingesetzten Leuchtdioden ausnutzen. Beispiele sind die Medizintechnik, wo unter anderem ultraviolette LEDs zum Polymerisieren von Kunststoffen in der Zahntechnik verwendet werden oder in der Licht-Hauttherapie auch als LED Photorejuvenation bekannt.

Des Weiteren kommen LEDs durch den im Vergleich zu Blitzlampen höheren Wirkungsgrad und das klare Linienspektrum in der Lasertechnologie häufig als Pumpquelle zum Einsatz.



Digitaluhr von 1978 mit LED-Anzeige. Links Uhrzeit, rechts Tag und Datum



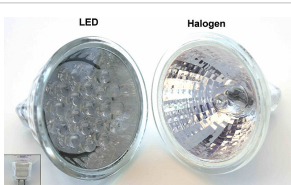
LED-Fahrradleuchten



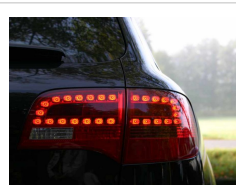
LED-Hinweistafel im Tokioter Bahnhof



Straßenbeleuchtung auf LED-Basis



LED-Lampe in gleicher mechanischer Bauform wie eine Halogenlampe



Rückleuchte mit LED-Technik



LED-Ampel



Rettungswagen mit LED-Frontblitzern und -Blaulicht auf dem Dach

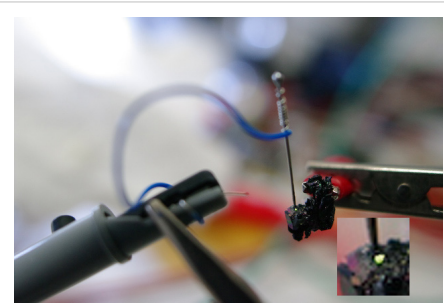
Geschichte

Am Anfang der Entwicklung von Halbleitern stand eine wissenschaftliche Entdeckung, die lange ignoriert wurde. 1876 hielt Ferdinand Braun einen Vortrag über Stromleitung durch Kristalle. Er schildert seine Versuche, bei denen er eine Metallspitze auf einen Sulfidkristall presste und herausfand, dass der Kristall in einer Richtung gut leitet und zwar umso besser, je höher der Strom ist – in die andere Richtung fließt hingegen nur wenig Strom. Da man damals nur ohmsche Leiter und Isolatoren kannte, passte dieser Gleichricht(er)effekt nicht in die damals bekannten Eigenschaften der Materie und es dauerte fast 60 Jahre, bis eine Erklärung dieser besonderen Merkmale gefunden werden konnte.^[8] Henry Joseph Round (1881–1966) beobachtete 1907 erstmals, dass anorganische Stoffe unter dem Einfluss einer angelegten Spannung zu einer Lichtemission fähig sind.^[9] 1921 entdeckte der russische Physiker Oleg Lossew den Round-Effekt erneut und untersuchte ihn 1927 bis 1942 genauer, da er vermutete, dass das Phänomen als Umkehrung des Einsteinschen, photoelektrischen Effektes zu deuten ist. Georges Destriau entdeckte 1935 an Zinksulfid ein ähnliches Leuchtphänomen und bezeichnete es nach dem russischen Physiker als Lossew-Licht.

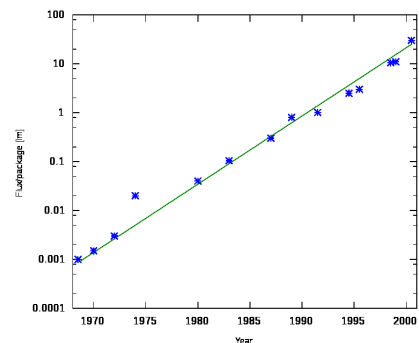
In der Folgezeit konnte ab 1951 durch die Entwicklung des Transistors ein wissenschaftlicher Fortschritt in der Halbleiterphysik erreicht werden. Weiter war es möglich, den Prozess der Lichtemission aufzuklären. Zunächst wurde allerdings weiter mit Zinksulfid experimentiert. Erfolgreicher waren jedoch die Forschungen an den als Halbleiter erkannten III-V-Verbindungshalbleitern. Ab 1957 konzentrierte man sich bei der Erforschung der Lichterzeugung ganz auf die Halbleiter. Besonders die Lichtemission im sichtbaren Bereich auf der Basis von Galliumarsenid (GaAs) und Galliumphosphid (GaP) war von Bedeutung.

Andere Quellen schreiben die Erfindung der Leuchtdiode allerdings Nick Holonyak zu und datieren sie auf 1962.^[10]

Im Laufe der Entwicklung, seit den ersten LEDs 1962, wurde die Lichtausbeute um ungefähr drei Größenordnungen von unter 0,1 Lumen/Watt auf über 100 Lumen/Watt gesteigert. Diese überwiegend in großen Sprüngen stattgefundenen Entwicklungsschritte beruhen außer auf der immer besseren Qualität der Halbleiterschichten (geringere Defektdichten, weniger Verunreinigungen) auf dem Einsatz von Halbleiterheterostrukturen, niederdimensionalen Strukturen (Quantentöpfe), transparenten Substraten und der verbesserten Lichtauskopplung. Ausgehend von GaAs/AlAs (1960er Jahre, rot-gelb), wurden neue Halbleitermaterialien wie GaP (1970er Jahre, grüne LEDs) und GaN (1980er/1990er Jahre, grün bis UV) entwickelt, so dass es heute LEDs in nahezu allen Farben des Spektrums (bis auf eine Lücke im grün-gelb-Bereich) gibt. Insbesondere nach Halbleitern, die Licht im kurzwelligen Bereich (blau, UV) effizient erzeugen, wurde lange gesucht. Hauptproblem war lange Zeit das Dotieren eines p-leitenden Bereichs von geeigneten breitlückigen Halbleitern, das erstmals 1988 bei GaN der Gruppe von Akasaki in Japan gelang, dann 1992 auch Shuji Nakamura mit einem anderen Ansatz. Letzterer führte zur ersten kommerziellen blauen LED auf GaN-Basis, die, inzwischen erweitert um weiße und grüne LEDs sowie blaue Laser, seit 1993 von Nichia vertrieben werden. Bis dahin basierten blaue LEDs auf dem Material Siliziumkarbid, das als indirekter Halbleiter für effiziente Lichtemission schlecht geeignet ist.



Nachbildung des Experiments von H. J. Round.
Eine negativ geladene Nadelspitze auf
Siliziumkarbid erzeugt einen grün glimmenden
Leuchtdiodenübergang.



Entwicklung des maximalen Lichtstroms
kommerziell erhältlicher LEDs. Die Skala ist
logarithmisch und die Gerade entspricht daher
einem exponentiellen Anstieg.

Die Steigerung der Effizienz und die preiswertere Herstellung der Halbleiter ist das Ziel weiterer Entwicklungen. Gegenwärtig wird besonders daran gearbeitet, sowohl transparente Trägermaterialien und Halbleiter-Materialien als auch transparente elektrische Zuleitungen herzustellen. Die Bonddrähte (elektrische Leitungen zum Halbleiterchip) decken einen Teil der aktiven Fläche ab.

Ein anderer aktueller Forschungsgegenstand sind organische Leuchtdioden, sogenannte „OLEDs“.

Stand der Technik

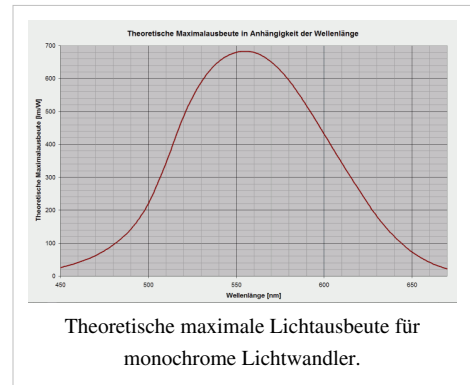
Lichtausbeute

Die effizientesten weißen LEDs erreichen derzeit (Stand Februar 2010) im optimalen Fall eine Lichtausbeute bis zu 208 Lumen/Watt^[11] bzw. seit September 2010 bei 250 lm/W^[12]. Das ist schon sehr viel, wenn man berücksichtigt, dass das theoretische Maximum (100 % Strahlungsleistung) bei 6600 K (relativ kalt wirkend) physikalisch nicht größer als ca. 350 lm/W sein kann. Die Lumenzahl ist stark von der Lichtfarbe abhängig, bei warmweißen LED liegt sie deutlich unter der von kaltweißen.

Ein weiterer Parameter ist die Leistung pro Einheit: je höher die Leistung einer einzelnen LED wird, desto schlechter ist ihr Wirkungsgrad. Das resultiert sowohl aus Quanteneffekten als auch aus einer höheren Temperatur des LED-Chips. Aus diesem Grund werden in vielen Anwendungen die LEDs nicht bei der vom Hersteller angegebenen Nennleistung, sondern darunter betrieben. Dadurch erhöht sich die Energieeffizienz und durch die reduzierte Temperatur verlängert sich die Lebensdauer der LED, gleichzeitig vereinfacht die geringere Abwärme die Kühlung und damit die Konstruktion der Leuchte. Allerdings kann es dadurch notwendig werden, mehr LEDs einzusetzen, um die gewünschte Lichtmenge zu erreichen, wodurch ggf. eine aufwändigere Optik notwendig wird.

Der Wirkungsgrad einer massengefertigten LED unterliegt einer gewissen Streuung. So wurden bereits vor Jahren einzelne LED-Labormuster mit hohem Wirkungsgrad im Labor hergestellt und bald darauf als Massenprodukt angekündigt. Mit dem sogenannten „Fluxbinning“ werden aus einer Produktion mehrere Klassen verschiedener Lichtströme selektiert und mit jeweils unterschiedlichen Preisen angeboten. Selbstverständlich wirbt ein Hersteller mit seiner höchsten Klasse. Wie klein der Anteil der besten Klasse an der Gesamtproduktion ist, erfährt man indirekt über den Preis und die Lieferbarkeit. Die angegebene Lichtausbeute bezieht sich einerseits auf die Anschlussschnittstelle eines LED-Bausteins, nicht auf eine LED-Lampe, bei der noch die Verluste durch das notwendige Vorschaltgerät mit 70 bis 95 % Wirkungsgrad dazukommen (dieser Wirkungsgrad wird sich Dank neuer (2010) gesetzlicher EU-Richtlinien merklich verbessern). Weitere Verluste entstehen durch eine (eventuell) weitere Optik in einer Lampe. Viele erhältliche LEDs liegen derzeit bei 30–80 Lumen/Watt. Die Lichtausbeute liegt damit über der von Glüh- und Halogenlampen mit circa 13 beziehungsweise 17 lm/W^[13] und teilweise unterhalb der von Leuchtstofflampen, die etwa 50 bis 70 lm/W inklusive Vorschaltgerät und Abschattungs- und Reflexionsverlusten erreichen. Da durch die Messung in der Einheit Lumen die Eigenschaften des menschlichen Auges berücksichtigt werden (vgl. Hellempfindlichkeitskurve), erreichen LEDs in den Farben Grün bis Rot besonders hohe Werte, während beispielsweise blaue LEDs deutlich schlechter abschneiden. Im rein physikalischen Wirkungsgrad, also der Umwandlung von elektrischer Energie in Licht, sind blaue LEDs nicht zwangsläufig schlechter. Physikalische Wirkungsgrade sind derzeit bis über 30 % erreichbar, bezogen auf die eigentliche LED, ohne Verluste durch Vorschaltgeräte und ggf. Optik.

Mitte Dezember 2006 erreichte eine LED von Nichia in Labortests 150 lm/W (fast 22 % Wirkungsgrad). Das entspricht bereits der Effizienz von Natriumdampf-Hochdrucklampen. Im September 2007 gelang es Cree im Labor, eine kaltweiße LED mit über 1000 lm bei einer Effizienz von 72 lm/W zu betreiben, die warmweiße Variante kam



bei 52 lm/W immerhin noch auf 760 lm Lichtausbeute. Seit Mai 2009 ist eine LED von Nichia auf dem Markt mit einer angegebenen Lichtausbeute von 160 lm/W, allerdings nur geringer Gesamtleistung. Cree lieferte im Dezember 2010 erste LEDs aus, die bei 1 W 160 lm/W erreichen und bei 10 W immer noch ca. 100 lm/W.

Im September 2009 begann Cree mit der Auslieferung einer weißen LED mit einer Lichtausbeute (Herstellerangaben) von 132 lm/W, die bei der maximalen Leistungsaufnahme von fast 10 W auf 105 lm/W abfällt, wobei für diesen Produktionstyp Lichtstromwerte bei 350 mA in den Leistungsklassen: 114 lm; 122 lm; 130 lm und 139 lm (=132lm/W) angeboten werden.^[14]

2007 galt für die Lichtausbeute handelsüblicher LED-Leuchten die Faustregel: Leistung der LED(s) multipliziert mit 4 ergibt die Leistung in Watt einer klassischen Glühlampe (5 % Wirkungsgrad). Seit 2009 eignet sich der Faktor 4 für den Vergleich mit Halogenlampen, die gegenüber Glühlampen um etwa 30 % effizienter sind. Die Leistungsfähigkeit neu in den Markt kommender Lösungen liegt darüber und nähert sich einem Faktor 10 gegenüber klassischen Glühlampen an. Cree berichtet in einer Pressemitteilung vom 3. Februar 2010^[11] über eine Labor-Prototyp-LED die 208 Lumen pro Watt bei Raumtemperatur erreicht. Die Farbtemperatur beträgt dabei 4579 K.

Anwendung

Da der Wirkungsgrad und die Standzeit schon seit einiger Zeit deutlich über dem von Halogenlampen liegen, schreitet die Anwendung besonders im Automobilbereich immer weiter voran. Für Blinker, Rück- und Bremsleuchten sowie Tagfahrlichter (vgl. LED-Scheinwerfer) sind Leuchtdioden seit 2001 im Einsatz, als Hauptscheinwerfer aufgrund höherer Anforderungen erst seit 2008.

Bereits jetzt ist die LED dabei, die Glühlampe in etlichen *Spezialanwendungen* zu verdrängen. Die Vorteile gegenüber der herkömmlichen Glühlampe: Die LED verbraucht weniger Energie bei gleicher Lichtmenge, erzeugt weniger Wärme, ist unempfindlich gegenüber Erschütterungen, erreicht deutlich kürzere Schaltzeiten und hat, eine niedrige Sperrschicht-Temperatur vorausgesetzt, eine hohe Lebensdauer.

Ab 2007 kamen von vielen Herstellern LED-Lampen für die üblichen E27- und E14-Glühlampensockel auf den Markt. Allerdings erreichten viele maximal 300 Lumen Helligkeit, was etwa einer 20 Watt starken konventionellen Glühlampe entspricht. Neben der für viele Zwecke ungenügenden Helligkeit wurde auch oft die bläuliche („kalte“) Lichtfarbe kritisiert. Während die Lichtfarbe immer noch ein Problem darstellt, ist eine ausreichend starke Beleuchtung mittlerweile möglich. Seoul Semiconductor etwa gab Ende Februar 2008 die Entwicklung und Markteinführung ultraheller LEDs bekannt, die 900 Lumen bei 10 Watt leisten.^[15] Das kommt etwa einer Glühlampe mit 75 Watt, respektive Energiesparlampen mit 17 Watt gleich.

Die hohen Ströme (typisch 350 mA und mehr) als Konstantstrom verlangen spezielle Treiberbausteine (Integrierte Schaltungen, Schaltregler) und elektronische Lösungen zur Ansteuerung. Der Betrieb mit niederfrequenter PWM genügt nicht allen Ansprüchen. Das thermische Management bekommt aufgrund der hohen Leistungen auf sehr kleiner Fläche (wenige mm²) und erforderlicher geringer Sperrschichttemperatur große Bedeutung – eine höhere Sperrschichttemperatur T_j (von englisch *junction*) hat eine Verminderung von Lebensdauer und Lichtleistung zur Folge. Eine „OSTAR LED“ nimmt beispielsweise bis zu 12 Watt auf^[16] (Lichtabgabe bis zu 1120 lm, Stand Januar 2009), was über thermische Substrate (beispielsweise Metallkernleiterplatte) und einen Kühlkörper an die Umgebung abgeführt werden muss.

Eine Studie der Universität Pittsburgh aus dem Jahr 2009^[17] verglich die Straßenbeleuchtung mit LEDs mit der mit Natriumdampf-Hochdrucklampen sowie mit Halogen-Metall dampflampen. Das Ergebnis der Studie war, dass die LED-Beleuchtung einen ähnlichen Ressourcenverbrauch über die Lebensdauer erzeugt wie die beiden anderen Technologien, dass bei den LEDs aber noch viel Potential zur Optimierung bestehe. Daher empfehlen die Autoren mittelfristig einen kompletten Umstieg auf LEDs zur Straßenbeleuchtung.

Beschaltung von LEDs

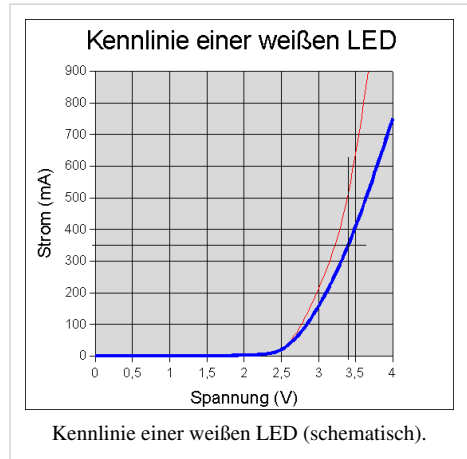
Die Helligkeit einer LED wächst mit der Leistungsaufnahme. Bei konstanter Halbleitertemperatur ist die Zunahme annähernd proportional. Der Wirkungsgrad sinkt mit steigender Temperatur, deshalb sinkt die Lichtausbeute an der Leistungsgrenze je nach Art der Kühlung ab. Die LED fällt aus, wenn die Temperatur des Halbleiters ein Maximum von zirka 150 °C übersteigt.

Die Strom-Spannungs-Kennlinie beschreibt, wie ein Verbraucher auf eine angelegte Spannung reagiert. Bei einem ohmschen Verbraucher nimmt der Strom linear mit der Spannung zu. Eine Leuchtdiode besitzt, typisch für Halbleiterdioden, eine exponentielle Kennlinie. Kleine Schwankungen in der Spannung verursachen große Stromänderungen.

Das Bild rechts gibt die Strom-Spannungskennlinie einer Leuchtdiode schematisch wieder. Die Skalierung bezieht sich auf eine weiße Hochleistungsleuchtdiode mit einem Nennstrom von 350 mA. Diesen Strom kann sie unter Normalbedingungen aufnehmen, ohne dass eine Überhitzung des Halbleiters zu befürchten ist. Aus ihrer Kennlinie liest man eine Durchlassspannung von etwa 3,4 V ab, entsprechend einer Leistungsaufnahme von etwa 1 W.

Eine LED sollte nicht unmittelbar an eine Spannungsquelle, wie eine Batterie, angeschlossen werden:

Eine weiße LED bleibt beim „Betrieb“ mit der Spannung 2,4 V (zwei NiMh-Akkus à 1,2 V) dunkel. Bei 3 V (zwei Alkali-Mangan-Primärzellen handelsübliche nichtaufladbare „Batterien“) erreicht sie gerade 30 % der Nennleistung. Drei Akku-Zellen mit zusammen 3,6 V jedoch steigern die Leistungsaufnahme auf über 150 %, ohne aktive Kühlung fällt die LED nach kurzer Zeit aus. Die rote Linie im Diagramm markiert eine etwas abweichende Kennlinie, verursacht durch Exemplarstreuungen der Halbleitereigenschaften beziehungsweise lokale Temperaturerhöhungen. Daher kann der Strom auch bei konstant gehaltener Durchlassspannung um mehr als 50 % anwachsen. Aus diesem Grund betreibt man LEDs mit einem konstant gehaltenen Strom.



Betrieb mit Vorwiderstand

Die einfachste Möglichkeit der Versorgung einer LED an einer Spannungsquelle ist, in Reihe zu ihr einen Vorwiderstand zu schalten. Der Wirkungsgrad ist prinzipiell nicht schlechter als bei einer linear geregelten Konstantstromquelle. Wird diese Anordnung mit einer Spannungsquelle betrieben, deren Spannung U_0 unter Last (Nennstrom I) bekannt ist, so lässt sich der gewünschte Strom I über die Wahl des Widerstandes einstellen:

$$R = \frac{U_0 - U_{\text{LED}}}{I}$$

Beispiel: $U_0 = 4,5 \text{ V}$, $I = 0,35 \text{ A}$, $U_{\text{LED}} = 3,4 \text{ V}$

$$R = \frac{4,5 \text{ V} - 3,4 \text{ V}}{0,35 \text{ A}} = 3,1 \Omega$$

Die Verlustleistung und damit die Baugröße des Widerstandes ergibt sich zu

$$P_{\text{verlust}} = \Delta U \cdot I_{\text{LED}} = 1,1 \text{ V} \cdot 0,35 \text{ A} = 0,385 \text{ W}$$

Der nächsthöhere Normwert ist 0,5 W.

Bei einer unregelmäßigen Spannungsquelle wie einem Netzteil aus Transformator mit Gleichrichter und Siebelko führt der Innenwiderstand der Quelle zu einer starken Abhängigkeit der Ausgangsspannung vom Laststrom. Bei der obigen Formel ist dann zu beachten, dass U_0 nicht die Leerlaufspannung ist, sondern die Ausgangsspannung beim

Nennstrom I , welche sich bei kleinen Transformatoren (ca. 3 VA) gegenüber der Leerlaufspannung nahezu halbieren kann.

Nachteil

Der Nachteil eines Vorwiderstands liegt in der starken Variabilität des Stroms bei einer veränderlichen Versorgungsspannung begründet, wie es beispielsweise in Bordnetzen von Kraftfahrzeugen der Fall ist. Das gilt vor allem dann, wenn durch die Reihenschaltung mehrerer LEDs eine relativ geringe Spannung am Vorwiderstand abfällt, was wiederum die Verluste gering hält.

Beispiel

Es werden an das 12-V-Bordnetz drei LEDs a 3,4 V angeschlossen, sodass bei $U = 12 \text{ V}$ nur 1,8 V für den Vorwiderstand verbleiben. Mit einem Vorwiderstand von $5,2 \Omega$ ergibt sich so ein Strom von 348 mA. Beim Laden des Akkus im Auto können aber durchaus Spannungen bis 14,4 V auftreten. Das hätte dann einen praktisch verdoppelten Strom von rund 700 mA zur Folge (der Spannungsabfall an der LED steigt ebenfalls leicht an), obwohl sich die Bordspannung nur um 16 % erhöht hat. Die gewählte Ausführung ist somit nicht betriebssicher und damit ungeeignet. Abhilfe könnte die Reduzierung der in Reihe geschalteten Leuchtdioden oder der Betrieb mit Konstantstromquelle darstellen.

Betrieb mit Konstantstromquelle

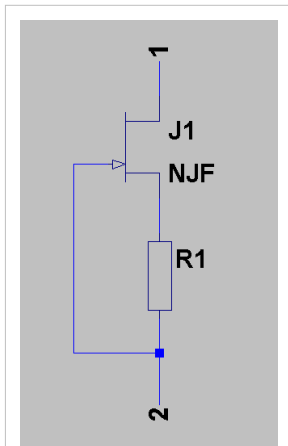
Je nach Einsatzzweck kann es vorteilhaft sein, Leuchtdioden an einer Konstantstromquelle zu betreiben. Damit entfällt das Problem der Abhängigkeit des Vorwiderstandes von der Versorgungsspannung. Die LED kann dann über einen sehr weiten Spannungsbereich mit einem konstanten Strom sicher betrieben werden. Konstantstromquellen lassen sich mit Transistoren oder integrierten Schaltkreisen realisieren.

Eine der Möglichkeiten zur Realisierung einer Konstantstromquelle bietet ein JFET in Form eines einfachen Linearreglers, der in Serie mit einer LED an eine Spannungsquelle geschaltet wird. Nebenstehende Schaltung wird dabei statt des Vorwiderstandes R in Serie zur LED geschaltet. Durch Wahl von R_1 kann die Stromstärke durch die LED eingestellt werden. Der Widerstandwert ist von den Parametern des JFET abhängig und – im Gegensatz zum Betrieb mit Vorwiderstand – nicht von der Versorgungsspannung. Übersichtsmaßig kann der Konstantstrom nach folgender Gleichung bestimmt werden:

$$I_D \approx \frac{U_{GS}}{R_1}$$

(U_{GS} ist die Spannung zwischen Gate und Source; dieser Wert ist aus dem Datenblatt des jeweiligen JFET zu entnehmen und gleich der Spannung, die im Betrieb am Widerstand R_1 anliegt.)

Die mit dieser Schaltung erzielbaren typischen Versorgungsspannungsbereiche können den Bereich von einigen wenigen Volt bis zu 100 Volt überstreichen und sind nur durch die Spannungsfestigkeit und maximale Verlustleistung des JFETs begrenzt. Der Betrieb einer LED oder einer Serienschaltung weniger LEDs an hohen Spannungen an einer Konstantstromquelle hat einen geringen Gesamtwirkungsgrad zur Folge. In diesem Fall und in



Als Stromquelle für LEDs
geeignete
Konstantstromquelle mit
JFET.

vielen Anwendungen mit Hochleistungs-LEDs mit Betriebsströmen ab einigen 100 mA aufwärts, werden zur Minimierung der Verluste häufig Schaltregler eingesetzt, welche auf einen konstanten Ausgangsstrom regeln.

Betrieb mit Schaltregler

Die beiden vorherigen Schaltungen haben den Nachteil, dass sie bei Abweichungen zwischen Durchlassspannung und Betriebsspannung das Produkt aus Spannungsdifferenz und Betriebsstrom in Form der Verlustleistung in Wärme umwandeln.

Effizientere Lösungen auf der Basis eines Schaltreglers beziehungsweise eines DC-DC-Wandlers mit Konstantstromausgang wandeln die Energie ähnlich effizient wie ein Transformator. Sie arbeiten im Schaltbetrieb bei hohen Frequenzen und verwenden zur Zwischenspeicherung der Energie Speicherdrosseln. Die hohe Schaltfrequenz und die Konstanzhaltung des Stroms sorgt dafür, dass so betriebene LEDs für das menschliche Auge weitestgehend flimmerfrei leuchten. Außerdem kann man mit dafür ausgelegter Elektronik den Betriebsstrom und damit die Helligkeit mittels Pulsweitenmodulation (PWM) steuern.

Betrieb an Netzspannung

Der effiziente Betrieb von LED an Netzspannung ist mit einem Gleichrichter und einem Vorschaltkondensator möglich. Die Summe der Flussspannungen der in Reihe geschalteten LED muss dabei deutlich geringer als die Netzspannung sein, um den Strom innerhalb der Netzspannungstoleranz ausreichend konstant zu halten. Diese oft in Leuchtmitteln angewendete Lösung erfordert zusätzlich einen Widerstand zur Strombegrenzung und einen weiteren Kondensator, die den Gleichrichter beziehungsweise die LED vor dem vom Vorschaltkondensator verursachten Einschaltstromstoß sowie vor Überspannungsimpulsen im Netz schützt.

Siehe auch

- Laserdiode
- Resonant-cavity light emitting diode

Literatur

- M. G. Craford: *Visible light-emitting diodes: Past, present, and very bright future*. In: *MRS Bulletin*. 25, Nr. 10, 2000, S. 27–31.
- E. Fred Schubert: *Light-Emitting Diodes*. Cambridge University Press, 2003, ISBN 0-521-53351-1.

Einzelnachweise

- [1] Datenblatt DS05 (<http://www.philipslumileds.com/pdfs/DS05.pdf>) SuperFlux LED-Gehäuse
- [2] Nichia Corporation (Hrsg.): *Specifications for Nichia Chip Type UV LED – Model: NCSU034AT* (http://www.nichia.co.jp/specification/en/product/led_library/NCSU034AT-E.pdf).
- [3] i-Magazin.at - Jetzt umsteigen? (<http://www.i-magazin.at/beleuchtungstechnik/leuchtmittel/jetzt-umsteigen.html>)
- [4] Philips MasterLED und Novallure - Schon jetzt die bessere Alternative (http://www.newscenter.philips.com/de_de/standard/about/news/press/licht/20100226_Philips_MasterLED_und_Novallure.wpd), Pressemitteilung vom 26. Februar 2010
- [5] Philips LED-Lampen – Nachhaltigkeit bedeutet nicht Verzicht (http://www.newscenter.philips.com/de_de/standard/news/lighting/20100913_Philips_LED_Lampen_Nachhaltigkeit_bedeutet_nicht_Verzicht.wpd), Pressemitteilung vom 13. September 2010
- [6] Birck Nanotechnology Center an der Universität Purdue
- [7] LEDs move into the ultraviolet (<http://physicsworld.com/cws/article/news/24926>), vom 17. Mai 2006
- [8] Karl Ferdinand Braun: *Versuche über Abweichungen vom Ohm'schen Gesetz in metallisch leitenden Körpern..* In: *Sitzungsberichte der Naturforschenden Gesellschaft zu Leipzig*. 3, 1876, S. 49–62.
- [9] Henry Joseph Round: *A note on carborundum*. In: *Elect World*. 19, 1907, S. 309.
- [10] *Der erste Licht emittierende Transistor* (<http://web.archive.org/web/20040308122129/http://www.wissenschaft-online.de/artikel/697047>). In: *Spektrumdirekt*. 7. Januar 2004, archiviert vom Original (<http://www.wissenschaft-online.de/artikel/697047>) am 8. März 2004, abgerufen am 31. Mai 2010.

- [11] CREE Pressemitteilung (http://www.cree.com/press/press_detail.asp?i=1265232091259)
- [12] Pressemitteilung von Nichia im LEDsMagazine.com (<http://www.ledsmagazine.com/news/7/9/4?cmpid=EnLEDsSeptember82010>)
- [13] *Der schnelle Dreh zum schöner Wohnen – Modernes Halogenlicht für Leuchten mit Schraubfassung* (http://www.osram.de/osram_de/Professionals/Allgemeinbeleuchtung/Halogenlampen/_pdf/101S04DE_Hochvolt-Halogenlampen_mit_Schraubsockel.pdf). In: *www.osram.de*. 14. November 2002, abgerufen am 28. Januar 2008 (PDF).
- [14] Cree XP-G LED (http://www.cree.com/products/xlamp_xpg.asp)
- [15] World's Highest Brightness of 900 lm at 10-Watt (<http://www.seoulsemicon.com/en/prCenter/news/view.asp?seq=45>), Nachricht auf der Website des Herstellers Seoul Semiconductor Inc.
- [16] PDF-Datenblatt OSTAR Headlamp LED (http://www.osram-os.com/osram_os/EN/News_Center/Spotlights/Products/OSTAR-Headlamp-automotive-front-lighting-LED.jsp)
- [17] Life Cycle Assessment of Streetlight Technologies (http://www.pitt.edu/news2010/Streetlight_Report.pdf), vergleichende Studie der Universität Pittsburgh zur Straßenbeleuchtung mit LEDs und Metalldampflampen

Weblinks

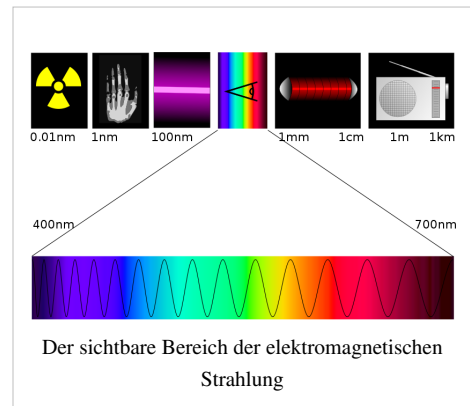
- Leuchtdiode (Grundlagen und Weiteres) (<http://www.led-info.de/grundlagen/leuchtdioden.html>)
- Resource of technical information (<http://lightemittingdiodes.org>) (englisch)
- Fernsehbilderzeugung mit rotierenden LED-Leisten (<http://www.youtube.com/watch?v=n7T1TY6HbLQ>)

Licht

Das für Menschen sichtbare **Licht** ist ein Bereich der elektromagnetischen Strahlung. Dieser erstreckt sich von etwa 380 bis 780 nm Wellenlänge, was einer Frequenz von etwa 789 bis 385 THz entspricht. Eine genaue Grenze lässt sich jedoch nicht angeben, da die Empfindlichkeit des menschlichen Auges an den Wahrnehmungsgrenzen nicht abrupt, sondern allmählich abnimmt. Die an das sichtbare Licht angrenzenden Bereiche der Infrarotstrahlung und Ultraviolettstrahlung werden häufig ebenfalls als Licht bezeichnet.

Lichtverhältnisse und Phänomene der Physiologie werden unter *Helligkeit* zusammengefasst.

Wissenschaft



Physiologie

Die unterschiedlichen spektralen Absorptionsfaktoren der Pigment-Moleküle (Blau, Grün-Gelb, Orange-Rot) in den drei verschiedenen Typen von Sehzapfen und in den Stäbchen des menschlichen Auges (V-Lambda-Kurve) ist Thema der Fotometrie. Die Sehzapfen ermöglichen durch das schmalere Absorptionsspektrum ihrer Pigmente die Farbwahrnehmung. Die Sehstäbchen enthalten als Pigment das Rhodopsin-Molekül, das ein breiteres Absorptionsspektrum hat. Sie sind empfindlicher als die Sehzapfen und registrieren die Lichtstärke.

Die *Farbwirkung* des physiologischen Sehens beruht auf der unterschiedlichen spektralen Absorption durch die Pigmente in den Sehzapfen. Die verschiedenen wahrgenommenen Farben entsprechen Licht mit unterschiedlichen spektralen Verteilungen. Werden aus Licht mit gleichmäßiger Spektralverteilung bestimmte Wellenlängen absorbiert, entsteht aus den verbliebenen Wellenlängen der Farbeindruck. Ein grünes Blatt absorbiert demnach nicht im Wellenlängenbereich „grün“ sondern im komplementären Bereich „rot“ (680 nm) und „blau“ (430 nm). Weitere Erläuterungen finden sich im Artikel Chlorophyll.

Das uns umgebende Licht in Natur und Technik besitzt unterschiedliche Wellenlängen. Durch ein optisches Gitter oder ein Prisma kann man dieses mehrfarbige Licht in seine einfarbigen Bestandteile zerlegen. Jeder dieser monochromatischen Lichtkomponenten entspricht ein spezifischer menschlicher Farbeindruck, die so genannten Spektralfarben oder mitunter auch als Regenbogenfarben bezeichnet. In der Reihenfolge zunehmender Wellenlänge findet man:



Wellenlängenbereiche der Spektralfarben

(etwa-)Farbton	Wellenlänge λ /nm	Wellenfrequenz ν /THz	Energie E pro Photon/eV	Wellenzahl $\tilde{\nu}$ /cm ⁻¹
Violett	380–420	789,5–714,5	3,26–2,955	26.316–23.810
Blau	420–490	714,5–612,5	<2,95–2,535	23.810–20.408
Grün	490–575	612,5–522,5	2,53–2,165	20.408–17.391
Gelb	575–585	522,5–513,5	2,16–2,125	17.391–17.094
Orange	585–650	513,5–462,5	2,12–1,915	17.094–15.385
Rot	650–750	462,5–400,5	1,91–1,655	15.385–13.333

Die Übergänge zwischen Farben sind fließend, der persönliche Farbeindruck einzeln benennbarer abzählbarer Farben ist subjektiv und durch Sprache, Tradition und Denken bedingt. Die in verschiedenen Sprachen (ursprünglich) vorkommenden Wörter für Farben belegen dies.

Die einzelnen Farbbereiche enthalten jeweils verschiedene Farbtöne. So ist der Zwischenbereich zwischen Blau und Grün etwa mit Türkis oder Cyan zu bezeichnen. Andere wahrgenommene Farben (beispielsweise Braun) ergeben sich bei Licht durch subtraktive Farbmischung aus gefiltertem weißem Licht oder indem mehrere Wellenlängen zusammen vorkommen (Additive Farbmischung).

Elektromagnetische Strahlung jenseits der menschlichen Grenze der Sichtbarkeit mit niedrigerer Wellenlänge als violett wird bis zu einer bestimmten Frequenz als Ultraviolett- oder UV-Strahlung bezeichnet, solche mit größerer Wellenlänge als rot bis zu einer bestimmten Wellenlänge als Infrarotstrahlung. Die Bandbreite des für Tiere sichtbaren Lichts weicht zum Teil erheblich vom menschlichen Sehen ab.^[2]

Physik

Die Hauptquelle des Lichtes auf der Erde ist die Sonne (Sonnenlicht). Künstliche Lichtquellen sind beispielsweise Glühlampen, Leuchtstofflampen, Leuchtdioden, Laser und chemisches Licht. Allgemein kann man unterscheiden zwischen thermischem Licht, das aufgrund hoher Temperatur entsteht und näherungsweise ein Planck-Spektrum aufweist, und Licht aus Quantenübergängen, das ein Linien- oder Bandenspektrum aufweist. Von den oben genannten Strahlungsquellen sind nur die Sonne und die Glühlampe thermische Lichtquellen. Das reduzierte Spektrum von Leuchtstofflampen ist wesentlich dafür verantwortlich, dass Farben von Gegenständen in ihrem Licht oft als "unnatürlich" wahrgenommen werden. Leuchtdioden und Laser liefern näherungsweise monochromatisches Licht, also Licht nur einer Frequenz.

Aus physikalischen Experimenten – wie dem Young'schen Doppelspaltexperiment – folgt zum einen, dass Licht Welleneigenschaften besitzt. Zum anderen folgt aus Experimenten zur Beobachtung des Compton-Effekts der Teilchencharakter des Lichtes. Dieser Welle-Teilchen-Dualismus ist durch die Quantenphysik aufgeklärt in dem Sinne, dass Licht sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften besitzt. Max Born versuchte diesen scheinbaren Widerspruch zu klären, indem er die „Welle“ als stochastisches Führungsfeld annahm und interpretierte, dass die Amplitude der Welle an einem bestimmten Ort der Wahrscheinlichkeit entspricht, ein Teilchen an diesem Ort zu finden. Die physikalisch genaueste Theorie des Lichtes ist die Quantenelektrodynamik.

Das Teilchenmodell postuliert *Lichtteilchen* (Photonen); sie besitzen keine Ruhemasse und bewegen sich unabhängig vom Bewegungszustand des Betrachters (siehe Michelson-Morley-Experiment) und unabhängig vom Medium mit der Lichtgeschwindigkeit c . Die Lichtgeschwindigkeit spielt eine entscheidende Rolle in der Relativitätstheorie, da diese die Grenzgeschwindigkeit aller Bewegungen darstellt. Im Innern von Materie sinkt die Geschwindigkeit eines Photons mit steigender Brechzahl zwar ab, aber die Photonen bewegen sich zwischen den Teilchen weiterhin mit Lichtgeschwindigkeit. Durch Absorption und Emission kann sich das Fortpflanzen einer Lichtwelle stark verzögern. Ein im Mittelpunkt der Sonne erzeugtes Photon benötigt etwa 10.000 bis 170.000 Jahre, um sie zu verlassen.^[3]

Gemäß der speziellen Relativitätstheorie besitzt ein Photon zwar keine Ruhemasse, transportiert aber eine Energie, der eine Masse zugeordnet werden kann. Wie alle Objekte wird Licht gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie somit in Gravitationsfeldern abgelenkt, da diese den Geodäten der Raumzeit folgen müssen. Weiterhin erzeugen sie selbst ebenfalls ein eigenes Gravitationsfeld, welches sich etwa in einem Ringlaser nachweisen lässt.

Neben der wahrnehmbaren Farbe (der Wellenlänge oder zugehörigen Frequenz entsprechend) wird Licht auch durch die Eigenschaften Kohärenz und Polarisation charakterisiert.

Vollständig lichtdurchlässige Gegenstände bezeichnet man als „durchsichtig“ oder „transparent“. Begrenzt lichtdurchlässige (nicht transparente) Gegenstände werden als „opaque“ oder „opak“ bezeichnet. Nicht lichtdurchlässige Objekte bezeichnet man auch als „undurchsichtig“. Die Schichtdicke hat hierbei großen Einfluss auf mögliche Abgrenzungen dieser Begriffe.

Biophysik

Bei den autotrophen Organismen wird die Energie des absorbierten Lichtes in chemischen Verbindungen gespeichert (siehe Photosynthese). Umgekehrt können einige Organismen (zum Beispiel Glühwürmchen) auch selbst Licht erzeugen, siehe Biolumineszenz.

Chemie

Bei *organischen Farbstoffen* können delokalisierte π -Elektronen durch Frequenzen im sichtbaren Bereich auf ein höheres Niveau gehoben werden. Dadurch werden je nach Molekül bestimmte Wellenlängen absorbiert.

Bei *anorganischen Farbstoffen* können auch Elektronen aus den d-Orbitalen eines Atoms in energetisch höher gelegene d-Orbitale angeregt werden (siehe Ligandenfeldtheorie). Des Weiteren können diese Farbstoffe ihre Position zwischen Zentralion und Ligand innerhalb eines Komplexes wechseln (siehe auch Charge-Transfer-Komplexe und Komplexchemie).

Größen und Einheiten

- Die Lichtgeschwindigkeit (c) ist unabhängig von der Bewegung der Quelle und sinkt in Medien gegenüber der Vakuumlichtgeschwindigkeit ab. Sie beträgt im Vakuum 299.792.458 Meter pro Sekunde und ist dort auch unabhängig von der Bewegung des Beobachters.
- Die Lichtfarbe ist von der Wellenlänge des Lichtes abhängig. Diese wiederum ist umgekehrt proportional zur Energie der Lichtquanten.
- Die Polarisierung des Lichtes beschreibt die Orientierung der elektrischen bzw. magnetischen Feldvektoren des Lichtes im Raum. Das flach an dielektrischen Flächen reflektierte Licht sowie das Licht des blauen Himmels ist teilweise linear polarisiert, während das Licht von Glühlampen und der Sonne keine Vorzugsrichtung der Polarisierung aufweist. Linear und zirkular polarisiertes Licht spielen in der Optik und Lasertechnik eine große Rolle.
- Lichtstrom (Lumen)
- Lichtmenge (Lumensekunde)
- Lichtstärke (Candela)
- Leuchtdichte (Candela/m²)
- Beleuchtungsstärke (Lux)
- Der Lichtdruck (Newtonsekunde) ist die physikalische Kraftwirkung des Lichtes auf Teilchen oder Gegenstände und spielt aufgrund seines geringen Betrages nur in der Schwerelosigkeit eine merkliche Rolle.
- Die Farbtemperatur (Kelvin) ist die der Temperatur eines schwarzen Strahlers zugeordnete Lichtfarbe einer Lichtquelle, um diese hinsichtlich ihres Farbeindrucks zu klassifizieren.
- Das Lichtjahr (Lj, ly) ist eine in der Astronomie verwendete Längeneinheit, welche die während eines Jahres vom Licht zurückgelegte Strecke angibt.

Licht in der Gesellschaft

Licht ist, wie Feuer, eines der bedeutendsten Phänomene für alle Kulturen. Künstlich erzeugtes Licht aus Lampen ermöglicht dem Menschen heutzutage ein angenehmes und sicheres Leben auch bei terrestrischer Dunkelheit (Nacht) und in gedeckten Räumen (Höhlen, Gebäuden). Technisch wird die Funktionsgruppe, die Licht erzeugt, als Lampe oder Leuchtmittel bezeichnet. Der Halter für die Lampe bildet mit dieser eine Leuchte. „Licht“ und „Leuchte“ werden auch als Symbole für Intelligenz verwendet (vgl. *Lichtblick*, Aufklärung). Ein Mangel an Intelligenz wird auch als „geistige Dunkelheit“ oder „geistige Umnachtung“ bezeichnet. Im Christentum steht das Licht in der Selbstbezeichnung Jesu Christi für die Erlösung des Menschen aus dem Dunkel der Gottesferne. In der biblischen Schöpfungsgeschichte ist das Licht das erste Werk Gottes.

Licht aus Sicht des deutschen Gesetzgebers

Licht zählt als ein Umweltfaktor zu den Immissionen i. S. des Bundesimmissionsschutzgesetzes (BImSchG). Lichtimmissionen von Beleuchtungsanlagen können das Wohn- und Schlafbedürfnis von Menschen und Tieren erheblich stören und auch technische Prozesse behindern. Entsprechend sind in der sog. „Licht-Richtlinie“ der Länder (in Deutschland) Maßstäbe zur Beurteilung der (Raum-)Aufhellung und der (psychologischen) Blendung festgelegt. Besonders störend kann intensiv farbiges oder blinkendes Licht wirken. Zuständig sind bei Beschwerden die Umwelt- bzw. Immissionsschutzbehörden der jeweiligen Bundesländer. Negative Auswirkungen betreffen die Verkehrssicherheit (Navigation bei Nacht, physiologische Blendung z. B. durch falsch eingestellte Autoscheinwerfer oder durch Flächenbeleuchtungen neben Straßen), Einflüsse auf die Tierwelt (z. B. Anziehen nachtaktiver Insekten, Störung des Vogelflugs bei Zugvögeln) und die allgemeine Aufhellung der Erdatmosphäre (Lichtverschmutzung, die z. B. astronomische Beobachtungen infolge Streuung des Lampenlichts in der Atmosphäre des Nachthimmels behindert).

Nachweis

Der intakte Sehsinn ist der einfachste Nachweis. Dementsprechend spielt das Auge eine wichtige Rolle bei der direkten Beobachtung von Vorgängen, an denen Licht beteiligt ist. Zwischen den verschiedenen Tierarten gibt es wesentliche Unterschiede in Bezug auf den Aufbau, das örtliche und zeitliche Auflösungsvermögen, die Empfindlichkeit und der Grenzen in denen das Spektrum gesehen werden kann.

Der Fotografische Film spielte bei der Erforschung der Natur des Lichtes eine große Rolle: Man konnte durch lange Belichtung geringste Lichtintensitäten von fernen Sternen und deren Spektren dokumentieren. Fotografische Schichten können für verschiedene Bereiche des Spektrums sensibilisiert werden.

Optische Strahlungsdetektoren nutzen meist den äußeren (Fotozelle, Vidicon, Bildverstärker, Photomultiplier) und inneren (Halbleiterdetektoren wie Fotodiode, Fototransistor, Fotowiderstand) photoelektrischen Effekt. Komplexe Sensoren (Zeilensensoren und Flächensensoren), die auch in Scannern und Digitalkameras als Aufnahmeelement dienen, arbeiten ebenfalls mit Halbleiterdetektoren. Farbsensoren arbeiten mit mehreren, hinter verschiedenen Filtern liegenden Fotodetektoren.

Durch Fluoreszenz und Photolumineszenz kann das Vorhandensein von Nachweis von Infrarot und Ultraviolett bemerkt werden, indem das erzeugte sichtbare Licht ausgewertet wird.

Licht lässt sich ebenfalls durch seine thermische Wirkung nachweisen. Auf diesem Prinzip beruhen die vorrangig zur Demonstration und Dekoration dienenden Lichtmühlen, die in der Astronomie verwendeten Bolometer zur Vermessung der Strahlungsleistung astronomischer Lichtquellen, sowie thermische Leistungsmesser für Laserstrahlen hoher Leistung.

Siehe auch

- Reflexion (Physik)
- Brechung (Physik)

Literatur

- Albert Einstein: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*. In: *Annalen der Physik*. 1905, S. 132–148. Mit diesem Beitrag begründete Einstein den Welle-Teilchen-Dualismus des Lichts.
- Klaus Hentschel: *Einstein und die Lichtquantenhypothese*. In: *Naturwissenschaftliche Rundschau*. 58, 6, 2005, ISSN 0028-1050 ^[4], S. 311–319.

- Thomas Walther, Herbert Walther: *Was ist Licht? Von der klassischen Optik zu Quantenoptik*. Beck, München 1999, ISBN 3-406-44722-8.
- Sidney Perkowitz: *Eine kurze Geschichte des Lichts. Die Erforschung eines Mysteriums*. Deutscher Taschenbuch Verlag, München 1998, ISBN 3-423-33020-1.
- George H. Rieke: *Detection of Light – From the Ultraviolet to the Submillimeter*. Cambridge Univ. Press, Cambridge 2003, ISBN 0-521-81636-X.

Weblinks

- Umfangreiche Informationen zur Physik des Lichts ^[5] auf Welt der Physik
- Lexikalische Nachweise zum Thema Licht ^[6]
- Infoline-Lichtplanung ^[7] (Online-Lexikon mit Basiswissen, Beispielen, Terminen, Adressen, etc.)
- Lichtmissionen - Umweltbehörde ^[8] (LANUV NRW)
- Modellvorstellungen von Licht ^[9] (Universität Ulm)
- Experimente mit einzelnen Photonen ^[10]

Videos

- *Was war der Äther?* ^[11] aus der Fernseh-Sendereihe *alpha-Centauri*
- *Was ist Licht?* ^[12] aus der Fernseh-Sendereihe *alpha-Centauri*
- *Wird Licht müde?* ^[13] aus der Fernseh-Sendereihe *alpha-Centauri*

Einzelnachweise

- [1] Hinweis: Am Computerbildschirm lässt sich vom Farbspektrum des Lichts nur ein sehr begrenzter Eindruck machen, da dieser nur drei Grundfarben und deren Überlagerungen darstellen kann. Vor allem in den Zwischentönen und beim Übergang ins Infrarote und Ultraviolette stößt die Anzeigetechnik an Grenzen.
- [2] *Information 'Sehfähigkeit bei Tieren'* (<http://www.optikinfo.at/content.php?id=294>). Abgerufen am 14. März 2010 (deutsch).
- [3] *The 8-minute travel time to Earth by sunlight hides a thousand-year journey that actually began in the core*. (http://sunearthday.nasa.gov/2007/locations/tt_sunlight.php). NASA, abgerufen am 30. Mai 2008 (englisch).
- [4] <http://dispatch.opac.d-nb.de/DB=1.1/CMD?ACT=SRCHA&IKT=8&TRM=0028-1050>
- [5] <http://www.weltderphysik.de/de/3783.php>
- [6] <http://www.kisc.meiji.ac.jp/~mmandel/recherche/licht.html>
- [7] <http://www.infoline-licht.de/>
- [8] <http://www.lanuv.nrw.de/licht/licht1.htm>
- [9] <http://www.pctheory.uni-ulm.de/didactics/quantenchemie/html/LichtF.html>
- [10] <http://www.QuantumLab.de>
- [11] <http://www.br-online.de/br-alpha/alpha-centauri/alpha-centauri-aether-harald-lesch-ID1207830558733.xml>
- [12] <http://www.br-online.de/br-alpha/alpha-centauri/alpha-centauri-licht-2002-ID1208353417016.xml>
- [13] <http://www.br-online.de/br-alpha/alpha-centauri/alpha-centauri-licht-2002-ID1208358841371.xml>

Lichtfarbe

Die **Lichtfarbe** entsteht durch die spektrale Zusammensetzung von Licht in Verbindung mit den Fotorezeptoren des Auges und der Verarbeitung im Gehirn.

Das Licht kann dabei direkt von einer Lichtquelle stammen oder von einem Körper reflektiert und farblich verändert worden sein (Körperfarbe).

Licht ruft einen Farbreiz hervor, indem es die Farb-Sinneszellen (beim Menschen sind dies Zapfen auf der Netzhaut, die empfindlich für rot, grün und blau sind) reizt. Um Körperfarben erkennen zu können, ist möglichst weißes Licht zur Beleuchtung nötig.

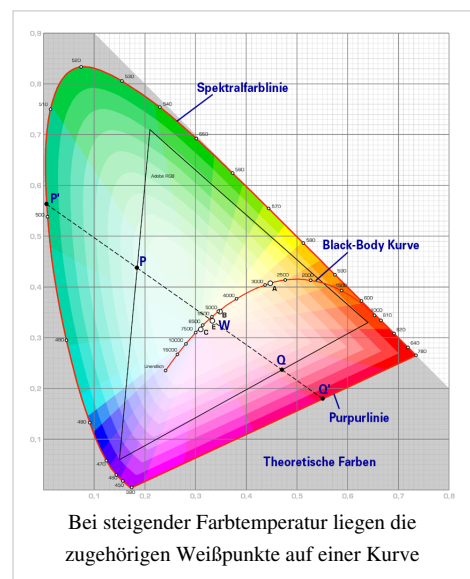
Die Farbe des Lichtes kann sich entweder aus diskreten einzelnen Farben je einer bestimmten Wellenlänge, aus einem Gemisch mehrerer Wellenlängen oder Wellenlängenbereiche oder aus einem kontinuierlichen Gemisch von Licht aller Wellenlängen eines bestimmten Spektralbereichs ergeben. Diese Intensitätsverteilung über die Wellenlängen des Spektrums entsteht in der Lichtquelle und/oder bei einer nachträglichen Filterung bei Transmission oder Reflexion an ihrerseits farbigen (wellenlängenselektiven) Stoffen.

Die Messung der Lichtfarbe orientiert sich an den physiologischen Wahrnehmungseigenschaften des menschlichen Auges.

Kontinuierliche Lichtemission aufgrund der Temperatur eines Strahlers

Licht kann ein kontinuierliches Spektrum haben, wenn es, wie das Sonnenlicht oder das Licht einer Glühlampe, von einem glühenden Körper ausgeht. Sein Spektrum folgt dem Planckschen Strahlungsgesetz. Die Lichtfarbe wird dann durch die Wellenlänge des Maximums des kontinuierlichen Spektrums bestimmt. Man kann eine entsprechende Farbtemperatur (TCP), gemessen in Kelvin (K), zuordnen, die gleich der Temperatur des strahlenden Glühkörpers ist. Sie beginnt bereits unmittelbar über dem absoluten Nullpunkt mit der Wärmestrahlung im fernen Infrarot. Je höher die Temperatur, umso kürzere Wellenlängen werden ausgesandt und desto „blauer“ wird folglich das Maximum.^[1] Dadurch erscheint eine glühende Herdplatte rot, Kerzenlicht gelblich, Sonnenlicht weiß und 10.000 K heiße Plasmen oder Fixsterne bläulich.

Das „weiße Licht“ eines Schwarzen Strahlers wird im Chromatizitätsdiagramm durch den Weißpunkt bezeichnet.



Elektronenprozesse

Andere Lichtquellen erzeugen Licht durch Elektronenübergänge zwischen Energieniveaus der Elektronenhülle von Atomen. Ihr Emissionsspektrum ist bedingt durch die Quantelung der Energiedifferenzen ein schmalbandiges Linienspektrum (siehe auch Gasentladung). Fluoreszenz in Festkörpern oder auch die Emission heißer dichter Plasmen erzeugt breitere Banden. Die wahrgenommene Farbe ist die einer einzelnen dominanten Linie oder Bande oder sie bildet sich aus mehreren Linien/Banden durch additive Farbmischung.

Beispiele sind Laser, Leuchtstoffe im Monitor, Leuchtdioden, Quecksilberdampflampen oder Natriumdampflampen. Spektrallampen können schmalbandige, sehr wellenlängenstabile Spektralfarben abgeben.

Quellen mit mehreren oder durch hohen Druck verbreiterten Emissionslinien können weiß erscheinendes Licht abgeben (Xenon-Höchstdrucklampen, Halogen-Metall dampflampen). Eine weitere Möglichkeit, weißes Licht zu erzeugen, wird bei Leuchtstoffröhren angewandt, indem die in einer Quecksilberdampf-Niederdruck-Entladung dominierende Ultraviolett-Strahlung durch fluoreszierende Substanzen in fehlende Spektralbereiche gewandelt wird.

Lichtfarben werden subjektiv wahrgenommen, können aber auch mit Farbsensoren gemessen werden. Sie entstehen aus dem Licht von Lichtquellen durch additive Farbmischung und bei Körperfarben durch subtraktive Farbmischung. So entsteht die Farbe Grün der Vegetation dadurch, dass das Chlorophyll den purpurnen Lichtanteil photochemisch absorbiert.

Wirkung auf den Menschen

Da blaues Licht zu einer Verringerung der Melatonin-Ausschüttung führt, wirkt solches sogenanntes *kalt*es Licht ermunternd und belebend, während *warm*es Licht (rötlich/gelblich, auch Warmton) gemütlich und einschläfernd wirkt. In der Lichttherapie wird kaltes Licht gegen Winterdepressionen eingesetzt. Weiterhin verbessert es das 3D-Sehen und die Auge-Hand-Koordination und erhöht die Kontraste.^[2]

Deshalb eignet sich kälteres Licht (4000 K bis 8000 K) für Arbeitsplätze, während für Wohn- und vor allem Schlafräume warmes Licht (≈ 2700 K) sinnvoll ist.

Es sind sogenannte *Vollspektrum-Tageslicht-Lampen* erhältlich, die ein tageslichtähnliches (6500 Kelvin), möglichst kontinuierliches Licht liefern und als gesundheitsfördernd beworben werden.^[3]

Die Lichtfarbe ist eine Kenngröße, um Leuchtmittel zu charakterisieren. So werden insbesondere Leuchtstofflampen zum Vergleich mit Glühlampen in folgende drei Gruppen eingeteilt:



Bezeichnung	Lichtfarbe		Wirkung auf den Menschen
warmweiß (ww)	unter 3300 K	gelbweißes Licht	als gemütlich und behaglich empfunden.
neutralweiß (nw)	3300 bis 5300 K	weißes Licht	sachliche Atmosphäre, Kunstlichtcharakter.
tageslichtweiß (tw)	über 5300 K	tageslichtähnliches Licht	wirkt technisch, anregend, „beißt“ sich nicht mit einfallendem Tageslicht

Bei Leuchtstoffröhren bestimmen die Leuchtstoffe auf der Innenseite der Glasröhre die Lichtfarbe. So kann außer Weiß auch fast jede andere Farbe erzeugt werden.

Die Lichtfarbe kann auch durch eingefärbtes Glas oder Filter verändert werden. Die Reflektoren von Kaltlichtspiegellampen lassen zum Beispiel den Rot- und Infrarotanteil der Glühlampe passieren und erzeugen so ein kälteres Lichtbündel, welches wenig Wärmestrahlung enthält.

Die Qualität der Farbwiedergabe eines Leuchtmittels wird durch den Farbwiedergabeindex (R_a) beschrieben. Weiß erscheinende Lichtquellen können dennoch Farbverfälschungen verursachen, wenn sie ein diskontinuierliches Spektrum aufweisen.

Normbeleuchtungsarten

Um in der Farbmeterik und beim Colormanagement vergleichbare Bedingungen zu schaffen, wurden Lichtfarben normiert. Eine weitere Anwendung solcher Klassifizierungen für Lichtfarben sind die Beleuchtungsarten im Falle des Normfarbraumes, um definierbare (vergleichbare) Lichtverhältnisse für Farbangaben zu Körperfarben zu erhalten.

Das Licht von Lampen gleicher Lichtfarbe kann unterschiedliche spektrale Zusammensetzung besitzen: metameres Licht wirkt farblich gleich, kann jedoch unterschiedliche spektrale Verteilung aufweisen. So kann man allein aus der Lichtfarbe einer Lampe nicht auf die exakte oder gleiche Farbwiedergabe schließen. Dagegen kann bei einem Monitor oder Fernseher aus drei Lichtfarben (rot, grün und blau) der gesamte Farbraum erzeugt werden.

Einzelnachweise

[1] Umrechnung von Farbtemperatur in Lichtart (<http://www.bruceindbloom.com>)

[2] Technologie Review: *Sonnenlicht aus der Deckenlampe* (<http://www.heise.de/tr/artikel/78064>). 14. September 2006

[3] Telepolis: *Computer können die Schlaflosigkeit fördern* (<http://www.heise.de/tp/r4/artikel/21/21805/1.html>). 19. Januar 2006



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Lichtquelle

Eine **Lichtquelle** ist der Ort, von dem Licht ausgeht. Lichtquellen lassen sich nach der Natur erzeugter Strahlung einteilen, nach dem Strahlengang ordnen und nach physikalischen Kennzeichen wie der Quantenenergie oder der Wellenlängenverteilung differenzieren. Weiterhin unterscheidet man sie nach ihrer räumlichen Ausdehnung als Punktlichtquellen oder diffuse Lichtquellen sowie nach ihrer jeweiligen Abstrahlcharakteristik als rundumstrahlend oder gerichtet strahlend.

Es gibt *natürliche* Lichtquellen, wie Sonne, Glühwürmchen, Polarlicht oder Blitz und vom Menschen geschaffene *künstliche* Lichtquellen, wie Öllampen, Leuchtmittel, Laser, Bildröhren, Leuchtdioden.

Lichtquellen 1. Ordnung sind selbstleuchtende Lichtquellen. Zu diesen Selbstleuchtern gehören die Sonne, Sterne, Lampen, Glühwürmchen, Feuer und andere, die Strahlung erzeugen, Licht emittieren. Als Lichtquellen 2. Ordnung bezeichnet man Körper, die nicht selbst leuchten und nur im Licht anderer scheinen; dies sind Mond, Rückstrahler an Fahrzeugen oder Kleidung und letztlich alle Körper, die Strahlung weitergeben, Licht reflektieren.

Künstliche Lichtquellen können primären Zwecken dienen wie der Beleuchtung, der Darstellung, der Erwärmung, der Verschmelzung, der Zerlegung oder auch sekundäre Erscheinungen sein, etwa die Tscherenkowstrahlung.

Thermische Strahler

Thermische Strahler liefern eine kontinuierliche Strahlung, mit steigender Temperatur verschiebt sich das Strahlungs-Maximum vom infraroten über rotes, hin zu blauem und ultraviolettem Licht (siehe Plancksches Strahlungsgesetz). Je heißer ein Strahler ist, desto blauer erscheint er.

Unterteilung nach Wärmequelle:

- Elektroenergie: Glühlampe, auch die Nernstlampe, das Plasma der Kohlebogenlampe
- chemische Energie (Verbrennung): Öllampe, Petroleumlampe, darunter auch die Starklichtlampe, Gaslaterne, Feuer, Kerze, Fackel: Flammen leuchten durch glühenden, dispersen Kohlenstoff oder das Licht entsteht durch einen Glühstrumpf
- Kernenergie: Sonne, Thermophotovoltaischer Wandler (Radionuklidbatterie)

Nichtthermische Strahler

Moleküle und Atome können durch Zufuhr von Energie in einen angeregten Zustand versetzt werden. Fallen sie zurück in den Grundzustand (Rekombination), geben sie ihre Energie teilweise als Strahlung mit Wellenlängen im sichtbaren Spektralbereich ab. Der optische Anteil der so entstehenden Strahlung heißt Lumineszenz.

Die zugeführte Energie (Anregung) einer Lichtquelle erfolgt zum Beispiel durch

- chemische Reaktion, wie bei Glühwürmchen oder dem Leuchtstab
- elektrischer Strom mittels Gasentladung oder Elektrolumineszenz, wie bei Leuchtdioden, Gasentladungslampen, EL-Folien
- Elektronenbeschuss, auch Betastrahlung aus einem fluoreszierenden Leuchtstoff, wie bei Bildröhren, Fluoreszenzanzeigen, auch durch Kathodolumineszenz, Tritiumlicht
- Licht/Ultraviolett (kürzere Wellenlänge): Wandlung durch Fluoreszenz (Leuchtstoff) in sichtbares Licht, so in Leuchtstoffröhren und weißen Leuchtdioden.

Gasentladungen in verdünnten Gasen zeigen sehr scharfe Spektrallinien. Bei Gasen unter Druck (Hochdruck-Metall dampflampen) verbreitern sich die Linien.

Fluoreszenz tritt nur während der Anregung auf, Phosphoreszenz dagegen auch, nachdem die äußere Anregung bereits erloschen ist. Beides sind Formen der Lumineszenz. Die Phosphoreszenz (Nachleuchten nach dem Beleuchten) wird bei Sicherheitsschildern, Zifferblättern oder als Dekoration verwendet.

Erzeugung sichtbaren Lichtes durch Röntgenstrahlung (Leuchtschirme älterer Geräte), durch Gammastrahlung (radioaktive Leuchtfarbe) sowie die Synchrotronstrahlung und die Tscherenkowstrahlung haben dagegen keine Bedeutung als künstliche Lichtquellen.

Laser werden durch elektrischen Strom, Strahlung kürzerer Wellenlängen oder chemische Energie angeregt, sie werden jedoch nur selten als Lichtquelle verwendet. Beispiele sind Infrarot-Zielbeleuchtung, Blendlaser oder rote Laserpointer.

Das Licht grüner Laserpointer wird durch Frequenzverdopplung aus einem infraroten Laserstrahl erzeugt.

Beispiele

Lichtquelle		Leistungsaufnahme	Lichtausbeute		
Grundtyp	Detailtyp	Watt	lm/W (minimal)	lm/W (typisch)	lm/W (maximal)
Flamme	Kerze	ca. 150 (Wärmeleistung)		0,1	
	Öllampe			0,2	
Flamme + Glühstrumpf	Starklichtlampe	bis 1000 (Wärmeleistung)		5,0	
Leuchtdiode	blau	0,05 bis >1	1,0	8,5	16,0
	rot	0,05 bis >1	5,0	47,5	90,0
	weiß, Entwicklungsziel der EU	0,05 bis >1			200,0
Leuchtdiode + Leuchtstoff	weiß (blau + Leuchtstoff)	0,05 bis >1	1,0	50,5	150,0 ^{[1] [2]}
Glühlampe	Haushaltsglühlampe 230V	5		5,0	
	Haushaltsglühlampe 230V	25		9,2	
	Haushaltsglühlampe 230V	40	10,0	10,0	10,3
	Haushaltsglühlampe 230V	60	11,5	12,0	12,5
	Haushaltsglühlampe 230V	75		12,4	
	Haushaltsglühlampe 230V	100	13,8	14,5	15,0
	Halogen 230V	100		16,7	
	Halogen 230V	500		19,8	
	Halogen 230V	1000		24,2	
	Halogen Niederspannung	50		20	
	Halogen 12 V (KFZ, real 13,8V)	55	27,0	27,5	28,0

Gasentladung + Leuchtstoff	Kompaktleuchtstofflampe	5		45,0	
	Kompaktleuchtstofflampe	23	40	60	80
	Kompaktleuchtstofflampe	26		70	
	Kompaktleuchtstofflampe	70		75	
	Leuchtröhre, auch als Kaltkathode oder CCFL bezeichnet	11	50	55	60
	Leuchtstofflampe mit konventionellem Vorschaltgerät (KVG, 50-Hz-Drossel)	36	60	75	90
	Leuchtstofflampe inkl. konventionellem Vorschaltgerät (KVG, 50-Hz-Drossel)	55	40	50	59
	Leuchtstofflampe mit elektronischem Vorschaltgerät (EVG)	36	80	95	110
	Leuchtstofflampe inkl. elektronischem Vorschaltgerät (EVG)	50	58	68	79
	Induktionslampe (Elektrodenlose Leuchtstoffröhre mit induktiver Speisung)			80	
Gasentladung	Xenon-Höchst-Druck-Gasentladungslampen in Videoprojektoren	100-300	10,0	22,5	35,0
	Xenon-Gasentladungslampe (Höchst-Drucklampen in Kinoprojektoren)	mehrere Kilowatt		47	
	Halogenmetall-dampf-lampe ^[3]	35 bis >1000	70	94	106
	Quecksilberdampf-lampe Hochdrucklampe (HID) ^[4]		50	55	60
	Glimmentladung ohne Leuchtstoff			8	
	Xenon-Bogenlampe		30	50	150
	Quecksilber-Xenon-Bogenlampe (KFZ-Frontscheinwerfer)	35	50-80	52-93	106 ^[5]
	Quecksilberdampf-Hochdrucklampe (HQL), teilweise mit Leuchtstoff	50		36	
	Quecksilberdampf-Hochdrucklampe, teilweise mit Leuchtstoff	400		60	
	Halogenmetall-dampf-lampe (HCL, HQL)	250	93	100	104
	Natriumdampf-Hochdrucklampe	ab 50		150	
	Natriumdampf-Niederdrucklampe	ca. 80	150	175	200
	Schwefellampe	1400		95	
Gasentladungsröhre	Natriumdampf-Hochdrucklampe	35 - 1000 W	120	140	150
theoretische Lichtausbeute	thermischer Strahler, 6600 K ^[6]				95
	weiß, 410–705 nm				240
	grün, 550 nm				683

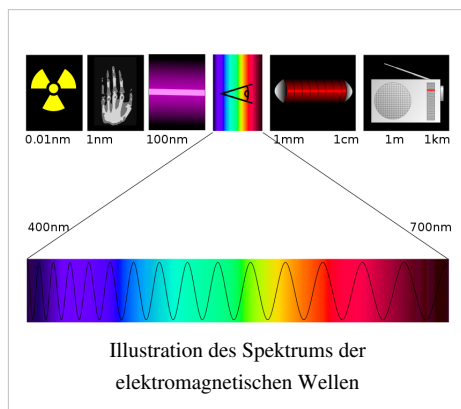
Neben der Lichtausbeute ist auch bei vielen weißen Strahlern der Farbwiedergabeindex von Bedeutung.

Einzelnachweise

- [1] weiße Leuchtdiode mit 150 lm/W. *Nichia NSPWR70CSS-K1 specifications* (http://www.nichia.co.jp/specification/led_09/NSPWR70CSS-K1-E.pdf). NICHIA Corporation, abgerufen am 29. Mai 2009.
- [2] weiße Leuchtdiode mit 136 lm/W: OSRAM Opto Semiconductors: (http://www.osram-os.com/osram_os/EN/Press/Press_Releases/Light_Emitting_Diodes/LED-chip-record.jsp) 21. Juli 2008
- [3] laut Osram (http://www.osram.de/_global/pdf/osram_de/produkte/display_optic/display_optik/5_TI-Blaetter/HMI/hmi18000WXSd.pdf)
- [4] nach Osram (<http://www.osram.de/>)
- [5] angeblich bei 50 W erreicht, Quelle (<http://www.nuconverter.de/assets/mpxld150.jpg>)
- [6] The Great Internet Light Bulb Book, Part I

Lichtspektrum

Das **Lichtspektrum** ist der Teil des elektromagnetischen Spektrums, der ohne technische Hilfsmittel über das menschliche Auge wahrgenommen werden kann. Weitere Bezeichnungen für das Lichtspektrum sind das **sichtbare Spektrum**, der **visuelle Bereich** (kurz **VIS** oder auch VIS-Bereich genannt) sowie umgangssprachlich auch Licht.



Die Spektralfarben im sichtbaren Licht^[1]

Farbe	Wellenlänge in nm	Frequenz in THz
rot	≈ 790–630	≈ 379–476
orange	≈ 630–580	≈ 476–517
gelb	≈ 580–560	≈ 517–535
grün	≈ 560–480	≈ 535–624
blau	≈ 480–420	≈ 624–714
violett	≈ 420–390	≈ 714–769

Der Wellenlängen-Bereich des Lichtspektrums reicht dabei von ungefähr 380 bis 780 nm,^[2] einem Frequenzbereich von ca. $3,8 \cdot 10^{14}$ bis $7,9 \cdot 10^{14}$ Hz entsprechend. Angrenzend an das für den Menschen sichtbare Lichtspektrum befindet sich im elektromagnetischen Spektrum der UV-Bereich bei kürzeren und der IR-Bereich bei längeren Wellenlängen, welche teilweise von anderen Lebewesen wahrgenommen werden können (siehe auch Spektralfarben).

Das Lichtspektrum enthält nur monochromatische Farben (Spektralfarben), nicht aber alle vom Auge unterscheidbaren Farben.

Siehe hierzu Farbraum: Während das Auge nahe beieinander auf dem Lichtspektrum liegende Lichtfarben mittelt

und als Zwischen-Farbtönen erkennt (zum Beispiel Rot + Grün = Gelb, Blau + Grün = Cyan oder Rot + Gelb = Orange), bilden die weit auseinander liegenden Wellenlängen Rot + Blau die Farbe Magenta, auch Purpur genannt.

Siehe auch

- Farbart
- Farbwahrnehmung
- Hellempfindlichkeitskurve

Einzelnachweise

- [1] Paul Dobrinski, Gunter Krakau, Anselm Vogel: *Physik für Ingenieure*. 11. Auflage. Teubner B.G. GmbH, 2007, ISBN 3835100203, S. 452 (Eingeschränkte Vorschau (<http://books.google.de/books?id=8C4ebqyCYCwC&pg=PA452>) in der Google Buchsuche).
- [2] *DIN 5031 - Teil 7: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Benennung der Wellenlängenbereiche*. Januar 1984.
Anmerkung (inhaltlich aus der DIN 5031 - Teil 7): Benachbarte Spektralbereiche des sichtbaren Spektrums können bei hoher Strahldichte sichtbar sein. Farbmessungen sollten daher den Bereich bis 830 nm berücksichtigen (siehe *DIN 5033 Teil 2: Farbmessung, Normvalenz-Systeme*). Bei extrem hohen Strahldichten kann es notwendig sein, den Messbereich bis ins UV-A oder IR-A zu erweitern.



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Liste der Farben im Farbkreis

Die **Liste der Farben im Farbkreis** bietet eine farbsystematische Eingliederung gebräuchlicher Farbbezeichnungen aller *bunten* Farben im *Farbkreis*.

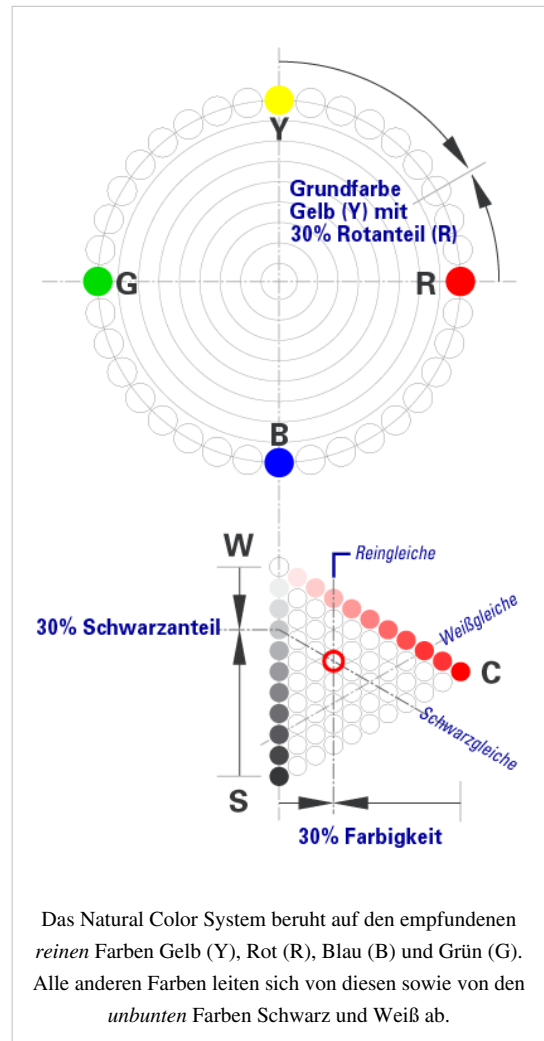
Aemilius Müller

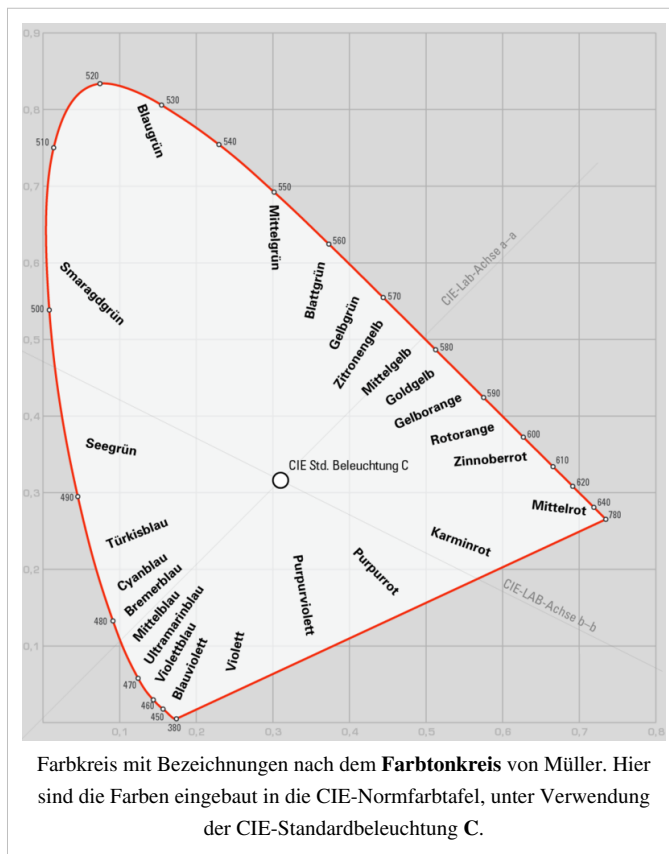
Als Basis dienen hierbei die von Aemilius Müller oder auch im Natural Color System verwendeten von den meisten Menschen als rein *empfundenen* Primärvalenzen (Grundfarben) (Mittel-)Gelb, (Mittel-)Rot, (Mittel-)Blau und (Mittel-)Grün. Die gewählte Einteilung und Abfolge der Farben ist unabhängig davon, ob subtraktiv (also Körperfarbe) oder additiv (also Lichtfarbe) gemischt wird. Je nach technischen Voraussetzungen ändern sich dabei lediglich die Grundfarben (bei Druckfarben also Cyan, Magenta und Gelb, bei Monitoren und Fernsehgeräten Rot, Grün und Blau).

Auf der dargestellten CIE-Normfarbtafel wird nach Müller der ursprünglichen Zuordnung der wahrgenommenen Farben zu bestimmten Spektralfarben Rechnung getragen. Hierbei war allerdings ein standardisiertes Weiß Grundlage der Zuordnung, und so gilt dies folglich nur für diesen (Spezial-)Fall.

Häufig als übergeordnete Farbnamen verwendete Begriffe wie Rot, Gelb, Grün, Blau, Braun tauchen in der Liste nicht auf, da ihnen kein fester Bereich auf dem Farbkreis zugeordnet werden kann. Hinzu kommt, dass Braun ein dunkles Orange wäre, also keine ungetrübte Farbe. Gleichermäßen entfällt es, die *unbunten*

Farben im Farbkreis darzustellen. Dem Farbkreis fehlt die dritte Dimension, die nach Graßmann benötigt wird, um alle vorstellbaren Farben anzuordnen. Historisch war es aber wichtig, diesen Farbkreis zu bilden, ehe es Anfang des 20. Jahrhunderts gelang, in der Helligkeit die dritte Komponente zu abstrahieren.





P	S	T	Farbname oder -bezeichnung	Bemerkung	Komplementärfarbe nach Müller
P	.	.	Mittelrot	wird als reines Rot empfunden, das weder zu Violett, noch zu Orange tendiert	etwa <i>Seegrün</i> (zu <i>Türkisblau</i> tendierend)
.	S	.	Zinnoberrrot	.	zwischen <i>Türkisblau</i> und <i>Seegrün</i>
.	S	.	Rotorange	.	etwa <i>Türkisblau</i> (zu <i>Seegrün</i> tendierend)
.	.	T	Ocker	Braun auf der Grundlage von Gelb	.
.	S	.	Gelborange	.	etwa <i>Türkisblau</i> (zu <i>Cyanblau</i> tendierend)
.	S	.	Indischgelb	.	.
.	.	T	Umbra	Braun auf der Grundlage von Gelb, dunkler als Ocker	.
.	S	.	Goldgelb	.	<i>Cyanblau</i>
.	S	.	Kadmiumgelb	.	.
P	.	.	Mittelgelb	wird als reines Gelb empfunden, das weder zu Orange, noch zu Grün tendiert; Grundfarbe in der Drucktechnik	zwischen <i>Blauviolett</i> und <i>Violettblau</i>
.	S	.	Zitronengelb	.	zwischen <i>Violettblau</i> und <i>Ultramarinblau</i>
.	.	T	Sepia	Braun mit grünlich-gelbem Grundton	.
.	S	.	Maigrün	.	.
.	S	.	Gelbgrün	.	etwa <i>Blauviolett</i> (zu <i>Violett</i> tendierend)

.	S	.	Grasgrün	.	.
.	.	T	Olivgrün	abgetöntes Grün	.
.	S	.	Blattgrün	.	etwa <i>Violett</i> (zu <i>Purpurviolett</i> tendierend)
.	S	.	Mittelgrün	wird als reines Grün empfunden, das weder zu Gelb, noch zu Blau tendiert	etwa <i>Purpurviolett</i> (zu <i>Violett</i> tendierend)
.	S	.	Blaugrün	.	etwa <i>Purpurviolett</i> (zu <i>Purpurrot</i> tendierend)
.	S	.	Smaragdgrün	.	<i>Purpurrot</i>
.	S	.	Phthalogrün	.	.
.	S	.	Seegrün	.	etwa <i>Mittelrot</i> (zu <i>Karminrot</i> tendierend)
.	S	.	Türkis	als Cyan Grundfarbe in der Drucktechnik	<i>Mittelrot</i>
.	S	.	Türkisblau	.	etwa <i>Gelborange</i> (zu <i>Rotorange</i> tendierend)
.	S	.	Cyanblau	.	<i>Goldgelb</i>
.	.	T	Coelinblau	.	.
.	S	.	Bremerblau	.	etwa <i>Mittelgelb</i> (zu <i>Goldgelb</i> tendierend)
.	.	T	Indigo	.	.
.	.	T	Preußischblau	.	.
P	.	.	Mittelblau	wird als reines Blau empfunden	etwa <i>Mittelgelb</i> (zu <i>Zitronengelb</i> tendierend)
.	.	T	Pariserblau	.	.
.	S	.	Ultramarinblau	.	etwa <i>Zitronengelb</i> (zu <i>Mittelgelb</i> tendierend)
.	.	T	Paynesgrau	.	Grau mit Tendenz zum bläulichen
.	S	.	Kobaltblau	.	.
.	S	.	Violettblau	.	etwa <i>Zitronengelb</i> (zu <i>Gelbgrün</i> tendierend)
.	S	.	Blauviolett	.	etwa <i>Gelbgrün</i> (zu <i>Zitronengelb</i> tendierend)
.	S	.	Violett	.	etwa <i>Blattgrün</i> (zu <i>Gelbgrün</i> tendierend)
.	S	.	Purpurviolett	.	zwischen <i>Blaugrün</i> und <i>Mittelgrün</i>
.	S	.	Purpurrot	als Magenta Grundfarbe in der Drucktechnik	<i>Smaragdgrün</i>
.	.	T	Krapplack	.	.
.	S	.	Karminrot	.	etwa <i>Seegrün</i> (zu <i>Smaragdgrün</i> tendierend)
.	.	T	Venezianischrot	Braun mit rotem Grundton	.
.	S	.	Scharlachrot	.	.

Mit den Interpretationen:

- P = Primärvalenz: nicht aus zwei anderen Farben mischbar

- S = Sekundärvalenz: aus zwei Primärfarben mischbar
- T = Tertiärvalenz: aus drei Primärfarben mischbar – entspricht immer einer abgetönten Primär- oder Sekundärfarbe

Farblich hinterlegte Namen sind die von Müller verwendeten Farbbezeichnungen.



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Magenta (Farbe)

Vierfarbdruck-Prozessfarbe Magenta

Farbe von Fuchsin (Magenta)

Magenta ist eine rotblaue Farbe, die auch als helles Purpur bezeichnet wird.

Der Name wurde zuerst verwendet als Synonym für den Anilinfarbstoff Fuchsin, der als zweiter derartiger Stoff erstmals 1858 hergestellt worden war und der mit der Schlacht von Magenta, die kurz darauf stattfand, in Verbindung gebracht wurde.

Farblehre

Die Farbe *Magenta*

- ist keine Spektralfarbe, sondern liegt auf der Purpurlinie, entsteht also nur durch additive Mischung der Farben Rot und Blau,
- ist die Komplementärfarbe zu Grün,
- ist eine der Grundfarben des CMY-Farbraumes, der die Grundlage für den Vierfarbdruck bildet, realisiert wird sie durch einen Farblack;
- im RGB-Farbraum wird als Magenta die additive Mischung der maximalen Intensitäten für Rot und Blau bezeichnet, dies entspricht im 8-Bit Modus dem Wert RGB = (255, 0, 255) dezimal bzw. FF00FF hexadezimal.

Die in den RGB- und CMY-Farbräumen definierten Magenta weichen voneinander und vom idealen Magenta auf der Purpurlinie sichtbar ab.

Markennutzung

„Telekom-Magenta“

Das Telekommunikationsunternehmen Deutsche Telekom AG hat die Farbe Magenta (RAL-4010) als Farbmarke für Waren und Dienstleistungen aus dem Bereich der Telekommunikation unter der Registernummer 39552630.2 registrieren lassen. Konkurrierende Unternehmen können daher bei Einsatz dieser Farbe in der Werbung abgemahnt werden. Das Corporate Design ist seit der Privatisierung 1995 gänzlich auf diese Farbe ausgerichtet, auch die Hörer an Telefonzellen sind magenta. Das Unternehmen versucht seit Jahren, den Farbton gerichtlich schützen zu lassen, und erzielte damit Erfolge sogar vor dem Bundesgerichtshof.^[1]

Die Farbe „Deutsche Telekom Magenta“ weicht geringfügig von der normalen Magenta ab: hex. #E20074, RGB dec: 226-0-116, Pantone: Rhodamine Red

Einzelnachweise

- [1] *Wie man sich eine Farbe zu eigen macht* (<http://depub.org/tagesschau/artikel/meldung304422/>). Auf: tagesschau.de, 10. September 2003 (im depub.org Archiv). Vgl. *Die Farbe Magenta. Deutsche Telekom legt sich mit Blog an* (<http://depub.info/tagesschau/artikel/magenta2/>). Auf: tagesschau.de, 3. April 2008 (im depub.info-Archiv).



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Metamerie (Farblehre)

Mit **Metamerie** (gr. *meta* - „nach, mitten unter“ und *meros* - „Teil“, das heißt „aus mehreren Teilen bestehend“) bezeichnet man in der Optik den Sachverhalt, dass verschieden zusammengesetzte Lichtspektren beim Menschen den gleichen Farbeindruck hervorrufen können. Die unterschiedlichen Farbreize mit gleichem Farbeindruck nennt man **metamere** oder **bedingt gleiche** Farben.

Das hat besonders bei Körperfarben praktische Folgen, deren Farbstoffe oder Pigmente nicht monochrom sind, das heißt einen relativ breiten Spektralteil des Umgebungslichtes reflektieren.

So kann ein Kleiderstoff einen anderen Farbeindruck erzeugen, wenn er unter einer anderen Lichtquelle betrachtet wird. Das andere Licht kann bestimmte Wellenlängen, die von den textilen Färbemitteln auch reflektiert würden, nicht enthalten (zum Beispiel im Licht der Glühlampen). In der Summe entsteht ein vom vorherigen abweichender Farbeindruck, der umgekehrt auch abweichend ist, wenn zusätzliche Wellenlängen vorhanden sind und reflektiert werden (zum Beispiel im Tageslicht).

Nach der Reparatur einer Auto-Karosserie passiert es oft, dass die neu lackierten Blechteile nicht mehr gleich aussehen wie die übrigen. Der ausgewählte Farblack führte im Kunstlicht der Werkstatt zum gleichen Farbeindruck, nicht aber im Tageslicht draußen. Dass beide Blechteile für sich draußen anders aussehen können, stört in der Regel nicht, störend ist ihr voneinander abweichendes Aussehen. Der in der Werkstatt ausgewählte oder gemischte Lack enthält nicht die gleiche Pigment-Mischung wie der Originallack, obwohl er bei der dortigen Beleuchtung zum gleichen Farbeindruck führt. Von den in der Regel zusätzlich im Tageslicht enthaltenen Wellenlängen werden entweder Anteile vom Original- oder vom Reparaturlack reflektiert, nicht aber von beiden Lacken die gleichen zusätzlichen Anteile.

Die unterschiedlichen Farbeindrücke einer bedingt gleichen Körperfarbe werden mit Hilfe des **Metamerie-Index** quantitativ beschrieben. Als Normal wird in der Regel Tageslicht beziehungsweise eine künstliche Lichtquelle verwendet, deren Licht dem Tageslicht sehr ähnlich ist.

Bei Farbbildreproduktionen zum Beispiel von Gemälden wird auf möglichst gute Übereinstimmung zwischen Original und Kopie bei einem „mittleren Licht“ geachtet, damit der Eindruck sowohl bei Tages- als auch bei Glühlampenlicht nicht allzu weit vom Original abweicht.

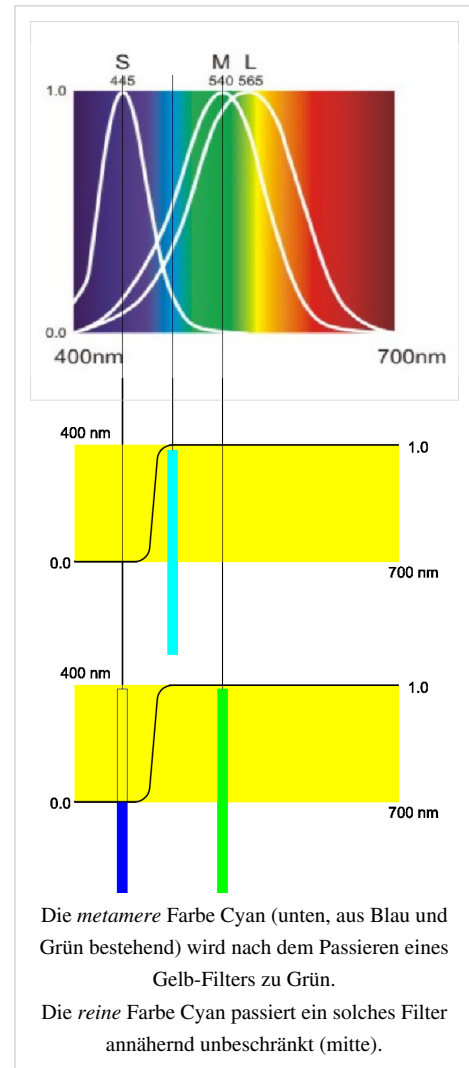
Grundlagen

Der Mensch kann Licht der Wellenlänge von etwa 380 nm bis etwa 780 nm in verschiedenen Farben sehen. Der Farbeindruck entspricht einerseits einer Wellenlänge des Lichts oder einem schmalen Bereich des Spektrums. Andererseits können ein kurzwelligeres und ein langwelligeres Licht gemeinsam den gleichen Farbeindruck wie ein einzelnes Licht mit dazwischen liegender Wellenlänge erzeugen. Theoretisch ist dieser Farbeindruck durch beliebig viele Kombinationen von Lichtern mit kleinerer und größerer Wellenlänge und damit eine große Zahl bedingt gleicher Farbreize möglich.

Ursache ist, dass die Netzhaut des Auges nicht für jede Wellenlänge oder für jeden schmalen Bereich des Spektrums mit gesonderten Rezeptoren (Zäpfchen) versehen ist. Die drei vorhandenen Zapfen-Typen sind in insich überlappenden Teilbereichen empfindlich, das heißt nicht nur für eine Wellenlänge empfindlich. Lediglich ihre maximale Empfindlichkeit kann jeweils einer Wellenlänge zugeordnet werden. Jede andere Wellenlänge wird aus der Summe von Signalen, die mittels wenigstens zwei verschiedener Zapfen-Typen empfangen werden, interpretiert.

Dieses Prinzip des Farbsehens lässt keine Unterscheidung zwischen Signalsummen mit gleichem Wert, aber verschiedener Zusammensetzung, beziehungsweise zwischen den bedingt gleichen oder metamer genannten Farben zu. Andererseits ist die technisch bedeutende Additive Farbmischung gerade erst wegen diese prinzipiellen „Mangels“ möglich. Das Auge kann veranlasst werden, alle Farben des Spektrums zu sehen, obwohl ihm nur Kombinationen dreier farbiger Lichter zugeführt werden brauchen.

Bei Tierexperimenten konnte nachgewiesen werden, dass für Menschen metamere Farben für andere Lebewesen nicht gleichfalls metamer sein müssen und umgekehrt. Dies liegt an einer anderen Zahl von Farbrezeptoren, beispielsweise bei Säugetieren meist zwei, bei Vögeln oft vier, oder abweichenden Empfindlichkeitskurven der Farbrezeptoren bei anderen Lebewesen. Dadurch unterscheiden sich auch die zur Farbempfindung notwendigen Gewichtungen der Signale der Zapfen.



Verhalten metamerer Farben bei subtraktiver Farbmischung

Die verschiedenen spektralen Anteile metamerer Farben werden bei subtraktiver Farbmischung nicht in gleichem Maße *subtrahiert*. Im schematisch abgebildeten Beispiel kann das *reine* Cyan (der Cyan genannte Spektralbereich) einen Gelb-Filter annähernd unbeschränkt passieren. Ein *metameres* Cyan, aus je einem Blau und Grün genannten schmalen Spektralbereich, wird beim Passieren eines Gelb-Filters in Grün verwandelt, denn der blaue Anteil wird herausgefiltert.

Der Metamerie-Index

Als Metamerie-Index wird der Farbabstand Delta E verwendet. Das ist der Abstand zwischen den Farborten, die den beiden Farbeindrücken in einem dreidimensionalen Farbraum, üblicherweise in einem Lab-Farbraum zugeordnet sind. Der seit 1976 verwendete Cielab-Farbraum aus dem CIE-Normvalenzsystem ging 1999 als weiter entwickelter Cielab-Farbraum unter der Kurzbezeichnung DIN99-Farbraum in DIN 6176 ein.^[1]

Als metamerie-frei gilt eine Farbe, deren Delta E bezüglich zwei vereinbarter Lichtquellen nicht größer als 0,5, für ungebübte Beobachter nicht größer als 1,0 ist.

Vermeidung von Metamerie

Textilindustrie

Der Käufer beurteilt die Kombinierbarkeit von Kleidungsstücken bei Tageslicht.

Zur Herstellung werden Färbemittel gesucht, die ein möglichst schmales Band des Lichtspektrums reflektieren. Man kann Metamerie aber auch so ausnutzen, dass gewebte, gewirkte oder gestrickte Muster erst bei besonderer Beleuchtung zum Vorschein kommen. Als Farben für das Muster oder den Hintergrund oder für beides werden bewusst nur bedingt gleiche Farben gewählt.

Lackindustrie

Die Farbe von Lacken wird von den in ihnen enthaltenen Farbpigmenten bestimmt. Davon gibt es eine sehr große Zahl, die in noch mehr möglichen Kombinationen eine sehr ausgedehnte Farbpalette ermöglicht. Weil diese Möglichkeit auch ausgenutzt wird, um ein neues Produkt zusätzlich noch mit einer möglichst neuen Farbe in den Handel zu bringen, werden mehr und mehr nur bedingt farbgleiche Lacke produziert. Teilweises Neulackieren eines solchen Produkts - häufig eine Auto-Karosserie - führt nur dann zu gleichem Farbeindruck, wenn der Reparaturlack die identische Pigmentkombination enthält. Der Lacklieferant des Auto-Herstellers hält diese aber geheim.^[2] Die farblichen "Nachstellungen" eines Lacks durch andere Lackhersteller haben nur mehr oder weniger gleiche Pigmentkombinationen wie der originale Lack. Der reparierende Lackierer sollte sich nicht darauf verlassen, dass der von einem anderen Hersteller stammende Lack unproblematisch ist. Er sollte wenigstens darauf achten, dass zum Beispiel die Karosseriebleche bei Tageslicht gleich farbig aussehen.

Digitalfotografie

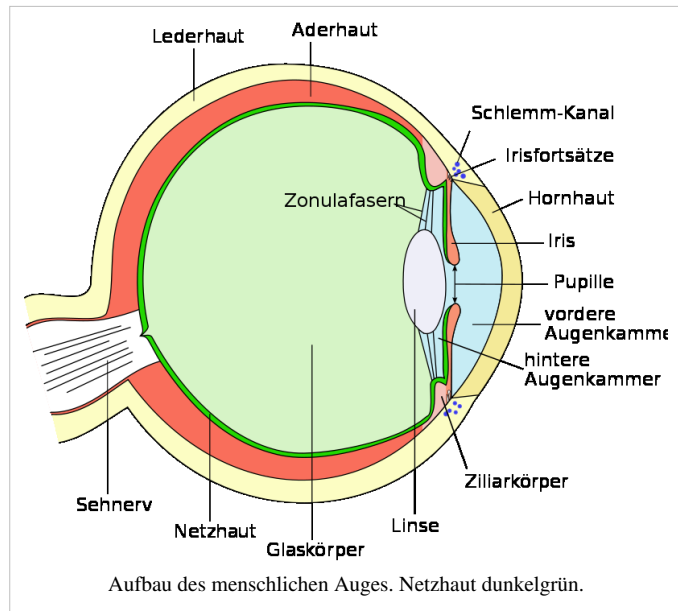
In der Digitalfotografie ist Metamerie ein indirektes Problem. Hier geht es darum, dass der Kamerasensor und das Auge metamere Farben gleich beurteilen. Das ist annähernd nach erfolgtem Weißabgleich möglich, wenn die Kamera auf die Farbtemperatur des beleuchtenden Lichts eingestellt ist.

Einzelnachweise

- [1] DIN 6172: *Metamerie-Index von Probenpaaren bei Lichtartwechsel*. Beuth Verlag
 [2] Lackindustrie und Metamerie (http://www.gaebel-berlin.de/index.php?option=com_content&view=article&id=71&Itemid=85)

Netzhaut

Die **Netzhaut** oder **Retina** (von lateinisch *rete* „Netz“) ist eine Schicht von spezialisiertem Nervengewebe an der hinteren Innenseite des Auges von Wirbeltieren und einigen Tintenfischen. In ihr wird das auftreffende Licht, nachdem es die Hornhaut, die Linse und den Glaskörper durchquert hat, in Nervenimpulse umgewandelt. Die Netzhaut besteht neben dem lichtempfindlichen Gewebsanteil aus Nervenzellen zur Verarbeitung und Weiterleitung der erzeugten Impulse sowie aus verschiedenen Unterstützungsstrukturen zur Aufrechterhaltung der Funktion der reizerzeugenden und -verarbeitenden Zellen.



Anatomie der Netzhaut des Menschen

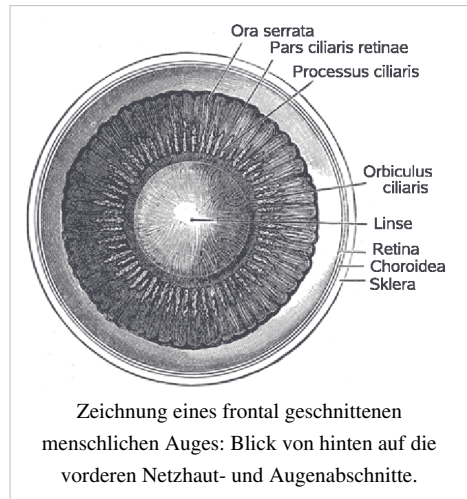
Richtungs- und Lagebezeichnungen

Die Schichten der Netzhaut betreffend bezeichnet man als *außen* die Seite der Netzhaut, die dem Licht abgewandt ist, also näher zur Außenwand des Augapfels liegt. Als *innen* wird entsprechend die lichtzugewandte Seite bezeichnet, die dem Augapfelzentrum näher liegt. Das Licht durchläuft die Netzhaut also von innen nach außen. Als *vorn* (*anterior* oder *distal*) bezeichnet man die Netzhautanteile, die am nächsten an den Strukturen des vorderen Augenabschnitts liegen, also in Richtung Hornhaut, Iris und Linse. *Hinten* (*posterior* oder *proximal*) liegen demnach die Netzhautanteile an der Wand des Augapfels, die der Hornhaut gegenüberliegt. Für die Angabe von Richtungen in der Querachse werden die Ausdrücke *nasenseitig* (*nasal*) oder *schläfenseitig* (*temporal*) gebraucht.

Abschnitte und Grenzen

Der größte Teil der Innenfläche des Augapfels ist von der *Pars optica retinae* bedeckt, welche die Fotorezeptoren trägt. Vorn, etwa 3 mm hinter dem Ziliarkörper (*Corpus ciliae*), liegt die *Ora serrata*, die Umschlagstelle und einzige feste Verbindung zwischen der nicht pigmentierten *Neuroretina* und dem pigmentierten Anteil (retinales Pigmentepithel). Vor der *Ora serrata* befindet sich die *Pars caeca retinae* (lat. *caecus* „blind“), die ganz vorn als *Pars ciliaris retinae* den Ziliarkörper überzieht. Die vorderen Netzhautabschnitte können am intakten Auge bei der Kontaktglasuntersuchung z.B. mit einem Dreispiegelkontaktglas betrachtet werden.

Der Netzhaut liegt außen die Aderhaut (*Chorioidea*) auf, welche per Diffusion die äußeren Netzhautschichten mit Nährstoffen versorgt. Innen liegt der Netzhaut der Glaskörper (*Corpus vitreum*) auf. In der Sehnervenpapille geht die Netzhaut hinten in den Sehnerv über, welcher die Nervenfasern der Ganglienzellschicht enthält.



Zeichnung eines frontal geschnittenen menschlichen Auges: Blick von hinten auf die vorderen Netzhaut- und Augenabschnitte.

Makroskopisches Bild der Netzhaut, Augenhintergrund

Beim Blick auf den Augenhintergrund (*Fundus oculi* oder *Fundus*) durch die Pupille schaut man durch die farblose und durchsichtige Neuroretina hindurch auf das dunkel pigmentierte retinale Pigmentepithel (RPE) und die darunterliegende, typabhängig mehr oder weniger dunkel pigmentierte Aderhaut. Als auffällige Landmarke findet man etwa 15° nasal von der optischen Achse die Austrittsstelle des Sehnervs (*Papilla nervi optici* oder *Papille*). Sie hebt sich durch ihre rosa bis hellrote Farbe vom übrigen Braunorange des Fundus ab. Die Papille hat einen Durchmesser von durchschnittlich etwa 1,5 mm und ist individuell unterschiedlich meist rund oder oval geformt.

Der blinde Fleck

Als blinder Fleck wird die Stelle im Gesichtsfeld bezeichnet, auf die sich der Sehnerv (*Nervus opticus*) projiziert (etwa 15° schläfenseitig vom Fixierpunkt). Dort, wo die Nervenfasern der Ganglienzellschicht durch alle Netzhautschichten hindurch den Augapfel verlassen, befinden sich keine Lichtrezeptoren (siehe unten). Das Gebiet des Sehnervenkopfes ist also wirklich „blind“.

Dass dieser „blinde“ Fleck auch bei einäugigem Sehen nicht wahrgenommen wird, liegt am sogenannten *Ergänzungseffekt*. Das visuelle System verwendet Informationen, die die Rezeptoren in der Umgebung des Sehnervs liefern, um das Bild zu ergänzen.



Ansicht des Augenhintergrundes bei der Augenspiegelung.
Zentral die Makula, rechts die Papille

Gefäße der Netzhaut, Macula lutea

Von der Papille ausgehend sieht man die großen Netzhautgefäße (*Arteriola und Venola centralis retinae*), die in ein oberes und unteres Büschel unterteilt sind und sich meist noch einmal in einen nasalen und einen schläfenseitigen Ast aufteilen. An ihrer unterschiedlichen Rottönung und am Kaliber können dabei die Arteriolen von den Venolen unterschieden werden.

Die schläfenseitigen Gefäßzweige umrunden bogenförmig ein gefäßarmes und im Zentrum gefäßfreies Gebiet, den „gelben Fleck“ (*Macula lutea*). Er hat einen Durchmesser von etwa 3 mm. Der Begriff „gelber Fleck“ wurde von Samuel Thomas von Soemmerring 1779 eingeführt, der die gelbliche Färbung dieses Netzhautareals beobachtet hatte. Er ist der einzig farbige Teil der Netzhaut, weil er ein gelbes Pigment, das Lutein, enthält.

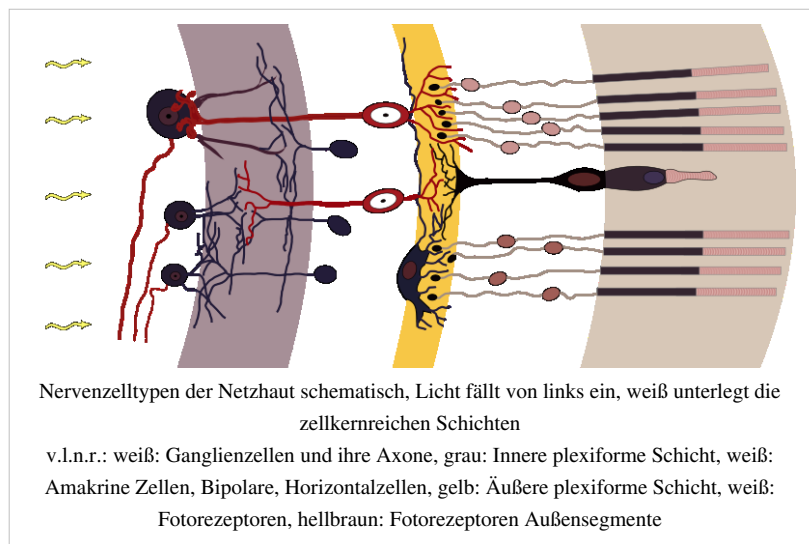
Das Zentrum des „gelben Flecks“ ist eine seichte Vertiefung, die Fovea centralis, kurz *Fovea* oder *Sehgrube* genannt. Rund um die Fovea centralis ist die Netzhaut zu einem flachen Wall verdickt. Diese Oberflächenform ist beim jugendlichen Auge an Lichtreflexen erkennbar.

Der „gelbe Fleck“ ist auch die Stelle des schärfsten Sehens. Hier besitzt die Netzhaut die größte Auflösung, wie man sie etwa beim Lesen benötigt. Die umgebende Netzhaut dient im Wesentlichen der Umfeldwahrnehmung, dem Erkennen von Dingen „aus den Augenwinkeln“. Bei schwerer Schädigung der Macula lutea, z. B. durch die altersbedingte Makuladegeneration (AMD), kann man nicht mehr lesen oder Auto fahren.

Nervenzellen der Netzhaut

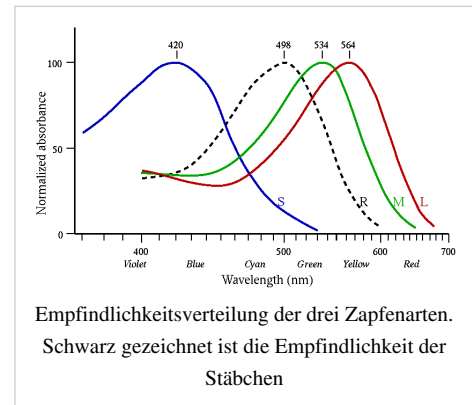
Ein Netzhautquerschnitt zeigt im Lichtmikroskop eine auffällige Schichtung, die durch abwechselnd zellkernreiche und -arme Lagen gebildet wird. Die Schichten besitzen charakteristische Zelltypen und subzelluläre Kompartimente. Die Nervenzellen der Netzhaut lassen sich in drei Gruppen gliedern:

- Die lichtempfindlichen oder fotorezeptiven Zellen, welche das eintreffende Licht in Nervenimpulse umwandeln. Dazu gehören die Stäbchen und Zapfen und eventuell weitere Zelltypen.
- Die zwischengeschalteten Zellen oder Interneurone, welche die erzeugten Impulse einer ersten Verarbeitung innerhalb der Netzhaut unterziehen. Dazu gehören die Horizontalzellen, die Bipolarzellen und die Amakrinen Zellen.
- Die Ganglienzellen, welche die verarbeiteten Informationen an die nächste Schaltstelle außerhalb der Netzhaut weiterleiten.



Fotorezeptoren

Den Fotorezeptorzellen kommt unter den Zellen der Netzhaut eine besondere Bedeutung zu, weil sie den eigentlich lichtempfindlichen Zelltyp darstellen. Die Fotorezeptorzellen sind hoch polare Zellen, welche aus einem Außensegment, einem Innensegment, dem Zellkörper und einem Axon mit einer spezialisierten Synapse am Ende bestehen. Grundsätzlich unterscheidet man in der Netzhaut zwischen zwei Fotorezeptorzell-Typen: Stäbchen und Zapfen (engl. „rods“ und „cones“). Die Stäbchen sind auf das Sehen bei schwacher Beleuchtung spezialisiert (skotopisches Sehen), die Zapfen sind für das Farbsehen (photopisches Sehen) verantwortlich.



Menschen sind Trichromaten, d.h., sie besitzen drei Zapfenarten mit unterschiedlichen Absorptionsmaxima. Vereinfacht kann man sagen, dass es rotempfindliche, grünempfindliche und blauempfindliche Zapfen gibt. Das Nervensystem kombiniert die Signale der drei Zapfenarten, um Licht einer bestimmten Spektralverteilung eine Farbe zuzuordnen. Die Zapfen sind weniger lichtempfindlich als die Stäbchen. Daher verändert sich das Farbempfinden bei Nacht, der sogenannte Purkinje-Effekt. Daher stimmt das Sprichwort: *Nachts sind alle Katzen grau* (zum Merken: mit den Stäbchen sieht man **schwarz/weiß**, mit den Zapfen **Farben**).

Schon ein einziges Lichtteilchen (Photon) kann ein Stäbchen aktivieren. Allerdings müssen mehrere Stäbchen aktiviert werden, damit die Netzhaut die Anwesenheit von Licht signalisiert. Beim Auftreffen eines Photons auf das in Membranstapel der Fotorezeptoren eingelagerte Sehpigment Rhodopsin erfährt letzteres eine Konformationsänderung. Dadurch wird eine Enzymkaskade ausgelöst, die sogenannte visuelle Signaltransduktionskaskade, die schließlich zur Aktivitätsänderung der Nervenzelle (Zapfen wie Stäbchen) führt. Für die Aufklärung der Bedeutung des Retinals 1933-1958 bekam der amerikanische Biochemiker George Wald 1967 den Nobelpreis für Medizin.

Möglicherweise gehört zu den Fotorezeptoren eine dritte Gruppe von Lichtsinneszellen; diese enthält das Pigment Melanopsin. Dieser Zelltyp wurde erst vor kurzer Zeit entdeckt und ist noch relativ unerforscht. Es wurde nachgewiesen, dass die Melanopsin-Zellen als Fotorezeptoren wirken und bei der Funktion der „inneren Uhr“ eine wichtige Rolle spielen. Sie senden Signale an den SCN (Suprachiasmatischer Nukleus), in dem circadiane Rhythmen generiert und so Zeitinformationen an den Körper weitergegeben werden (siehe Chronobiologie). Nach neuen Erkenntnissen sind diese Ganglienzellen auch für den Pupillenreflex zuständig.

Horizontalzellen, Bipolarzellen, Amakrinzellen

Zwei unterschiedliche Typen von Horizontalzellen verschalten die Fotorezeptoren untereinander. Sie stehen selbst mit Nachbarzellen über Gap-Junction-Verbindungen in Kontakt. Horizontalzellen dienen u. a. zur Kontrastverstärkung durch laterale Inhibition benachbarter Fotorezeptoren.

Die Bipolarzellen werden durch die Fotorezeptoren innerviert. In der Säugetierretina unterscheidet man je nach Tierart acht bis zwölf Typen von Bipolarzellen, die Zapfen kontaktieren (Zapfen-Bipolarzellen), und einen Bipolarzelltyp, der Stäbchen kontaktiert (Stäbchen-Bipolarzellen). Dabei unterscheidet man zwischen ON- und OFF-Bipolarzellen. ON-Bipolarzellen depolarisieren auf einen Lichtreiz, wobei OFF-Zellen mit einer Hyperpolarisation reagieren.

Die Bipolarzellen innervieren die Amakrinzellen. Amakrinzellen sorgen – ähnlich wie zuvor die Horizontalzellen – für eine sowohl laterale als auch vertikale Verschaltung des neuronalen Netzwerks in dieser Schicht der Netzhaut und tragen ebenfalls zur Modulation der Signalverarbeitung bei. Insgesamt gibt es über 30 verschiedene Amakrinzelltypen. Ein Typ, die sogenannte A2-Amakrinzelle, leitet Signale von Stäbchen-Bipolarzellen an die Zapfen-Bipolarzellen weiter und koppelt damit diese beiden Signalfade. Ein anderer Typ der Amakrinzellen, die

sogenannte *Starburst*-Zelle, ist am Bewegungssehen beteiligt^[1].

Ganglienzellen

Den Bipolar- und Amakrinzellen nachgeschaltet sind die Ganglienzellen. Sie sind die Ausgangsneurone der Netzhaut und leiten die visuelle Information über den Sehnerv (Nervus opticus) zur nächsten Schaltstation im Gehirn dem *Corpus geniculatum laterale* weiter. Insgesamt lassen sich etwa 20 Ganglienzelltypen unterscheiden.

Schichten der Netzhaut

Das Licht durchdringt die gesamte Netzhaut und wird erst von den Photorezeptorzellen detektiert. Vom Glaskörper hin zur Aderhaut kann man bei der gesunden Netzhaut folgende Schichtstruktur unterscheiden.

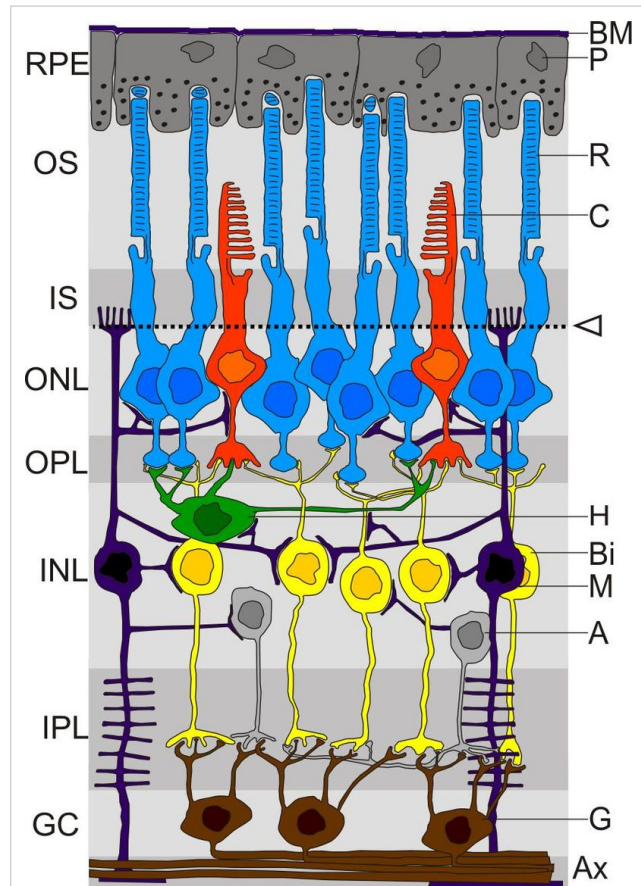
Epiretinale oder innere Grenzmembran (membrana limitans interna, *ERM* / *ILM* epiretinal / internal limiting membrane)

Die innere Grenzschicht der Retina ist die Basal- und Plasmamembran der Müllerschen Zellen sowie möglicherweise anderer Gliazellen. Sie besteht darüber hinaus aus Kollagenfasern und Proteoglykosiden.

Diese im Lichtmikroskop homogen erscheinende Schicht bildet die innere Begrenzung der Netzhaut gegen den Glaskörper. Sie bedeckt die gesamte Retina und geht vorne mit einer etwas vergrößerten Struktur in die Zonulalamelle über.

Die älteren Histologen waren der Ansicht, dass die pinselförmigen Endfüße der Müllerschen Stützfasern fest in der Grenzmembran verankert sind, letztere also als gliöses Produkt zu werten ist. Das Elektronenmikroskop konnte jedoch zeigen, dass die innere Grenzmembran den Charakter einer Basalmembran hat und von den Fußpunkten der Müllerschen Zellen klar abgegrenzt werden kann. Die klinisch nachweisbare starke Haftung der Membran an der Retina kommt wahrscheinlich durch die mit Kittsubstanz gefüllte Zwischenschicht zustande, welche die Gliafortsätze der Müllerschen Zellen mit der Grenzmembran verbindet.

Gaertner fasst die innere Grenzmembran als periphere Verdichtung des Glaskörpergewebes auf, da sich ihre Faserlamellen schichtweise von der Retina abheben und in die Glaskörpermembran übergehen. Die Dicke der Grenzmembran beträgt ca. 2-3 µm.



Schichten und Zelltypen der Säugetierretina, RPE: retinales Pigmentepithel, OS: Außensegmente der Photorezeptorzellen, IS: Innensegmente der Photorezeptorzellen, ONL: äußere nukleäre Schicht, OPL: äußere plexiforme Schicht, INL: innere nukleäre Schicht, IPL: innere plexiforme Schicht, GC: Ganglienzellschicht. P: Pigmentepithelzelle, BM: Bruch-Membran, R: Stäbchen, C: Zapfen, H: Horizontalzelle, B: Bipolarzelle, M: Müller-Zelle, A: Amakrine-Zelle, G: Ganglienzelle, Ax: Axone, Pfeil: Membrana limitans externa.

Nervenfaserschicht (NFL – nerve fiber layer)

Sie besteht aus Anhäufungen der Nervenfasern (*Axonen*) der Ganglienzellen. Diese tragen die verarbeitete Information aller Fotorezeptoren nach außen. Die Nervenfaserschicht enthält – beim Menschen – etwa 1 Million Ganglienzellaxone. Diese Nervenfasern sind marklos und erhalten ihre Myelinscheiden erst nach dem Austritt aus dem Bulbus. Eine Zerstörung der Nervenfaserschicht hat für das betroffene Netzhautgebiet eine irreparable Erblindung zur Folge (zum Beispiel beim Grünen Star).

In der Sehgrube (*Fovea*) ist die Faserdichte am geringsten. Die Axone verlaufen von hier sternförmig ausgehend in einem mehr oder weniger ausgeprägten Bogen zur Austrittsstelle des Sehnervs (*Papille*). Zwischen Fovea und Papille laufen sie zusammen und bilden so das sog. *makulopapilläre Bündel*. Alle übrigen Ganglienzellaxone laufen um dieses Bündel entweder oben oder unten bogenförmig herum. Hierbei überschreiten sie nie die horizontale Mittellinie (*Rhaphé*).

Die Nervenfasern der vorderen Netzhaut, deren Ganglienzellkörper am weitesten von der Papille entfernt liegen, verlaufen am weitesten außen in der Faserschicht. So bleiben sie, wenn sie zur Papille ziehen außen und nehmen deshalb auch eine mehr periphere Position im Sehnerv ein. Die Axone der Ganglienzellen, die näher zur Papille liegen, verlaufen oberflächlicher, dadurch kommen sie im Sehnerv auch mehr zentral zu liegen.

Auch zentrifugale Fasern – vom Gehirn zur Retina – sind verschiedentlich in der Nervenfaserschicht beschrieben worden. Ihre Funktion und Bedeutung ist jedoch ungewiss. Einige Autoren ordnen ihnen Hemmfunktionen im Sehakt zu, andere bringen sie in Verbindung mit der Gefäßinnervation des retinalen Gefäßnetzes.

In der Nervenfaserschicht und der angrenzenden Ganglienzellschicht verlaufen auch die größeren Blutgefäße der Retina. Außerdem sind in dieser Schicht auch Neurogliazellen und versprengte Ganglienzellen vorhanden. Dicke der Nervenfaserschicht: ca. 20-30 µm.

Ganglienzellschicht (GCL – ganglion cell layer)

Enthält die Zellkörper der Ganglienzellen.

Die Dendriten der Ganglienzellen ziehen in die angrenzende IPL, wo sie sich verzweigen und die Signale von den Bipolarzellen und den Amakrinzellen entgegennehmen. Weitergeleitet an die visuellen Zentren im Gehirn werden die Signale schließlich über die Axone der Ganglienzellen, welche in der Nervenfaserschicht verlaufen und sich zum *Nervus opticus* bündeln.

Die Größe der Zellkörper ist verschieden, die Lage der Zellen in der peripheren Retina meist einschichtig, in mittleren und zentralen Zonen mehrschichtig. Neben den Ganglienzellen sind in der GCL noch einige Typen von Amakrinzellen ('displaced amacrine cells') und Gliazellen zu finden. Dicke der Schicht: ca. 20-30 µm.

Innere plexiforme Schicht (IPL – inner plexiform layer)

Letzte Vorverarbeitungsstufe, bevor die Information an die visuellen Zentren im Gehirn weitergeleitet wird.

Die IPL besteht aus einem dichten Geflecht, das von den Axonterminalen der Bipolarzellen und den Dendriten der Amakrin- und Ganglienzellen gebildet wird. Die Bipolarzellen liefern die Signale der Fotorezeptoren aus den äußeren Retinaschichten. Diese Signale werden durch synaptische Interaktionen mit Amakrinzellen moduliert und schließlich an die Ganglienzellen weitergeleitet.

Gelegentlich finden sich in der IPL auch Zellkörper von „deplatzierten“ (*misplaced*) Neuronen, außerdem Neuroglia. Die Dicke dieser Schicht beträgt etwa 50–70 µm.

Innere Körnerschicht (INL – inner nuclear layer)

Die innere Körnerschicht enthält die Zellkörper von funktional stark unterschiedlichen Zellen.

In der INL sind die Zellkörper von Bipolar-, Amakrin- und Horizontalzellen für die Vorverarbeitung von Signalen angesiedelt, sowie die Zellkörper des neuronalen Stützgewebes, der Müller-Zellen. Am weitesten außen liegen die Horizontalzellen, dann folgen die Zellkörper der Bipolarzellen und Müller-Zellen, an der inneren Begrenzung liegen die amakrinen Zellen. Insgesamt lassen sich 10 bis 12 Zellschichten unterscheiden. Die Dicke der inneren Körnerschicht beträgt 30 µm.

Äußere plexiforme Schicht (OPL – outer plexiform layer)

Die Äußere plexiforme Schicht stellt die Verbindung zwischen Photorezeptoren und den nachgeschalteten Zellen her.

Dendriten der Bipolar- und Horizontalzellen werden mit den synaptischen Enden der Photorezeptoren verschaltet und bilden somit die erste Stufe der intraretinalen Informationsverarbeitung. Diese Schicht enthält auch die Fortsätze der Müllerschen Stützfasern. In der Übergangszone zur nächsten Schicht liegt das tiefere Versorgungsnetz der retinalen Kapillaren, die Abkömmlinge der zentralen Netzhautarterie sind. Diese Gefäße verlaufen sehr konstant in einer Ebene und stoßen kaum in andere Schichten vor. Die Dicke dieser Schicht beträgt etwa 20 µm.

Äußere Körnerschicht (ONL – outer nuclear layer)

Die äußere Körnerschicht ist die Schicht der Zellkörper der Photorezeptoren.

Die Zellkörper der Stäbchen und Zapfen sind im ONL parallel nebeneinander gruppiert und erstrecken ihre verdickten lichtsensitiven Fortsätze, die Außensegmente, in Richtung des RPE. Die Kerne der Zapfen liegen in einer einzelnen Schicht nahe der Grenzmembran, die der Stäbchen bilden 4 bis 6 Lagen. Eine Ausnahme von dieser Anordnung besteht beim Menschen in der Fovearegion, in der Zapfen auch mehrschichtig gelagert sind.

Besonders zu vermerken ist, dass in dieser Schicht wesentlich mehr Zellkerne anzutreffen sind, als in der Schicht der Bipolar- und Ganglienzellen. Die Dicke dieser Schicht beträgt etwa 40 µm.

Äußere Grenzmembran (ELM – external limiting membrane)

Die äußere Grenzmembran ist die abschließende, undurchlässige Membran.

Sie wird durch Ausläufer der Müllerschen Zellen und Zelladhäsions-Verbindungen (*Adhering junction*) mit den Photorezeptorzellen gebildet. Dieses fibrilläre Netzwerk lässt kreisförmige Öffnungen für den Durchtritt der Rezeptoren frei. In der Region der Ora serrata setzt sich die äußere Grenzmembran in die Substanz fort, die die beiden Schichten des Ziliarepithels verbindet.

Innensegment (IS – inner segment)

Stoffwechselreiche Kompartimente der Photorezeptoren.

Das IS ist der Bereich der Photorezeptorzellen, der Mitochondrien und endoplasmatisches Retikulum (ER) enthält. Hier erfolgt unter anderem die Proteinbiosynthese und andere Stoffwechselaktivität. Getrennt werden die inneren von den äußeren Segmenten durch ein schmales Verbindungscilium, durch welche alle Stoffe für das Außensegment aktiv transportiert werden müssen.

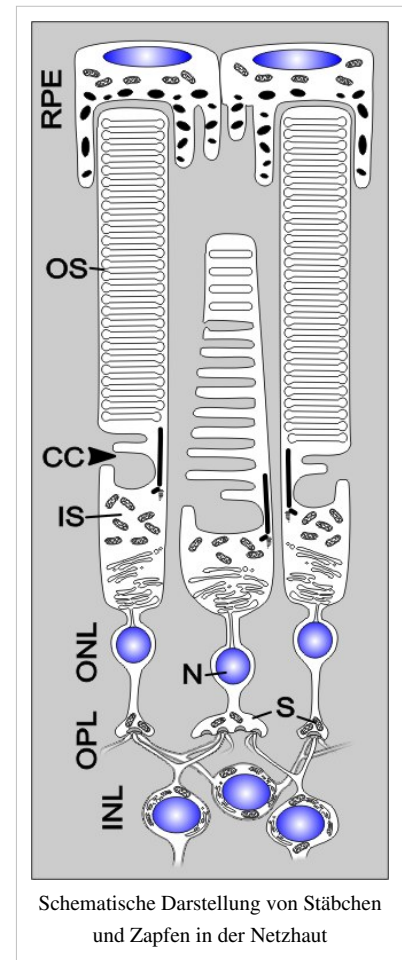
Außensegment (OS – outer segment)

Hauptartikel: Außensegment

Das Außensegment ist das lichtensitive Kompartiment der Photorezeptoren. Hier erstrecken sich die Außensegmente der Photorezeptoren vom Verbindungscilium bis zum RPE. Am Verbindungscilium entstehen neue *Diskmembranen*, Membranabschnürungen bepackt mit Rhodopsin. Rhodopsin ist in die *Disks* eingelagert und initiiert die visuelle Signaltransduktion. Durch die Neusynthese bewegen sich diese *Disks* zum RPE und werden dort phagozytiert.

Retinales Pigmentepithel (RPE – retinal pigment epithelium)

Lichtfilter und Stoffaustausch mit Photorezeptoren. Ganz außen wird die Netzhaut vom RPE, einem hexagonal aufgebauten, einschichtigen Epithel begrenzt, welches die Trennschicht zwischen der Netzhaut und der Aderhaut (Chorioidea) bildet. Die Zellen des RPE enthalten durch Melanin schwarz gefärbte Melanosomen, welche funktionell Lichtfilter darstellen. Apikal umgreifen fingerartige, mikrovilläre Fortsätze des RPE die Photorezeptorzellen, welche der Ernährung der Photorezeptoren, dem Recyceln der alten Diskmembranen der Photorezeptoraußensegmente sowie der Regeneration des gebleichten Retinals aus aktiviertem Rhodopsin dienen. Basal zeigen diese Zellen tiefe Furchen, die dem besseren Stoffaustausch mit den Blutgefäßen der Chorioidea dienen. RPE-Zellen verhindern ein Eintreten von Blut aus der stark vaskularisierten Choriocapillaris (die stark durchblutete Grenzschrift der Aderhaut). In der *Pars optica retinae* wird die Verbindung zwischen dem RPE und der *Neuroretina* nur durch einen vom RPE aktiv erzeugten Sog aufrechterhalten, eine feste Verbindung existiert nur an der *Ora serrata*.



Erkrankungen der Netzhaut

Beispiele für Erkrankungen der Netzhaut sind:

- Diabetische Retinopathie als Folgezustand einer (schlecht eingestellten) Zuckerkrankheit
- Makuladegeneration
- Netzhautablösung
- Netzhautforamen
- Gefäßverschlüsse (Ischämie, Infarkt)
- Retinopathia centralis serosa (schwellungsbedingte Netzhautabhebung)
- Retinopathia pigmentosa (angeborene Erbkrankheit der Netzhaut, früher *Retinitis pigmentosa* genannt)
- hypertensive Retinopathie (durch Bluthochdruck verursachte Netzhauterkrankung)
- eklamptische Retinopathie (bei Schwangeren im Rahmen von Eklampsie auftretende Netzhauterkrankung)
- Retinopathia praematurorum (Netzhauterkrankung bei Frühgeborenen)

- Azoor Akute zonale okkulte äußere Retinopathie
- Retinoschisis Netzhautspaltung
- periphere Netzhautdegeneration (Verdünnung der Netzhaut, 'Glitzerwolken')

Untersuchungsverfahren

Die Standardmethode zur Untersuchung der Netzhaut ist die Ophthalmoskopie. Sie besteht in der Beleuchtung des Augenhintergrundes und der Betrachtung des reflektierten Bildes mit einer Lupe. Sie wird seit der Erfindung des Augenspiegels durch Hermann von Helmholtz 1851 durchgeführt.

In den letzten Jahrzehnten haben sich mehrere weitere Verfahren zur Netzhautdiagnose etabliert.

- Eine relativ neue, technisch herausragende Methode ist die Optische Kohärenztomografie (**OCT**), die die Abbildung um die dritte Dimension erweitert. Sie ermöglicht zudem die Anfertigung von hochauflösenden Schnittbildern oder auch 3D-Tomografien mit einer zum histologischen Bild vergleichbaren Qualität (Auflösungsvermögen bis 3 μm im Vergleich zu 0,3 μm beim Lichtmikroskop).

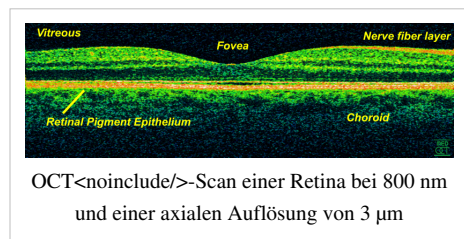
Hier können die einzelnen Schichten aufgelöst und in ihrer Dicke vermessen werden. Dadurch lassen sich feinste Unterschiede feststellen, die für die maßgeschneiderte Therapie mancher Netzhauterkrankungen oder auch beim Testen von Medikamenten maßgeblich sein können.

Weitere Untersuchungs- und Beurteilungsmöglichkeiten bestehen auf elektrophysiologischer Ebene durch

- das Elektroretinogramm (ERG)
- das Elektrookulogramm (EOG)

sowie zur Darstellung der retinalen Durchblutung durch

- die Fluoreszenzangiographie (auch FLA, FAG oder Angio abgekürzt)
- die Indozyaningrünangiographie
- die Retinale Gefäßanalyse



Siehe auch

- Aderhaut, Uvea, Bruch-Membran
- Emmertsches Gesetz
- visuelle Signaltransduktion
- Netzhautprojektor
- Retinometer

Referenzen

[1] Imke Ortmann. *Live beobachtet: der Richtungsdetektor im Auge* in *Spektrum der Wissenschaft*, November 2002, Heft 11, S. 12ff.

Weblinks

- Miniaturbildübersicht Netzhaut von Säugetieren (<http://www.uni-mainz.de/FB/Medizin/Anatomie/workshop/EM/EMRetina.html>)
- Dendritic Processing in the Retina (<http://wbmo.mpimf-heidelberg.mpg.de/~teuler/>)
- „Das Fotolabor in der Netzhaut“ Max-Planck-Forschung 03'2001 (<http://www.mpih-frankfurt.mpg.de/global/Bilder/NAd.pdf#search=„das ist die Netzhaut WÃssle“>)
- elektronenmikroskopische Bilder der menschlichen Netzhaut (<http://www.uni-mainz.de/FB/Medizin/Anatomie/workshop/EM/EMHRetina.html>)
- Webvision - The Organization of the Retina and Visual System (<http://webvision.med.utah.edu/>) - exzellente Webseite des *John Moran Eye Centers* der Universität Utah zu nahezu allen Aspekten der Säugerretina (engl.)

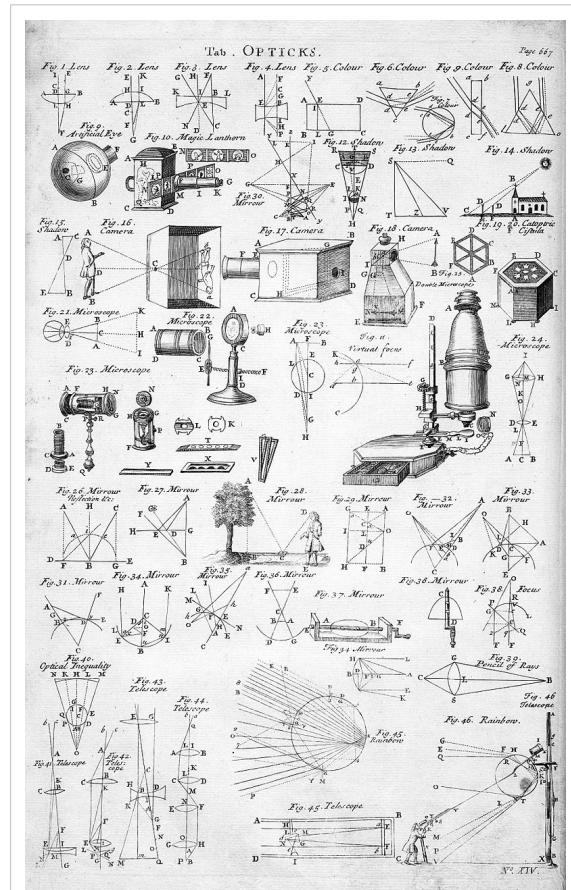
Optik

Optik (griechisch $\sigma\pi\alpha\kappa\eta$ – *optike* – „Lehre vom Sichtbaren“, *optiko* „zum Sehen gehörig“, zu *opsis* „das Sehen“) ist ein Bereich der Physik, der sich mit der Ausbreitung von Licht und dessen Wechselwirkung mit Materie, insbesondere im Zusammenhang mit optischen Abbildungen, beschäftigt. *Optik* wird daher auch als die Lehre vom Licht bezeichnet.

Die „technische Optik“ ist im Sinne einer Definition von Optik als Teilbereich der Physik keine optische, sondern eine technische Disziplin. Zusätzlich wird die Summe aller optischen Bauteile eines optischen Gerätes umgangssprachlich *Optik* genannt, ohne Wissenschaft zu sein.

Unter Licht versteht man in der Regel den sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums im Bereich 380 nm und 780 nm. In der Physik wird als optisches Spektrum häufig auch der Frequenzbereich ab einer Frequenz von 1 THz bis 300 THz definiert. Hierunter fällt also auch das unsichtbare Licht, wie das Infrarotlicht oder das ultraviolette Licht. Viele Gesetzmäßigkeiten und Methoden der klassischen Optik gelten allerdings auch außerhalb des Bereichs sichtbaren Lichts. Dies erlaubt eine Übertragung der Erkenntnisse der Optik auf andere Spektralbereiche, zum Beispiel die Röntgenstrahlung (siehe Röntgenoptik) sowie Mikro- und Funkwellen.

Auch Strahlen geladener Teilchen bewegen sich in elektrischen oder magnetischen Feldern oft nach den Gesetzen der Optik (siehe Elektronenoptik).



Tafel mit optischen Gerätschaften, 1728 *Cyclopaedia*

Teilbereiche der Optik

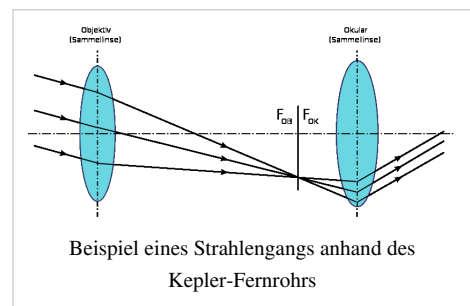
Man unterscheidet zwei klassische Zugänge zur Lichtausbreitung: Die Wellenoptik und die geometrische Optik. Grundlage der Wellenoptik ist die Wellennatur des Lichts. Die Gesetzmäßigkeiten der geometrischen Optik gelten für den Fall, dass die Abmessungen des optischen Systems sehr groß sind gegenüber der Wellenlänge des Lichts. Bei geringen Abmessungen der Komponenten gegenüber der Wellenlänge spricht man von der Mikrooptik.

Eine wichtige Teildisziplin der Optik ist die Quantenoptik, die sich mit den Wechselwirkungen von Licht und Materie beschäftigt. Dabei spielt besonders der gequantelte Charakter des Lichts eine bedeutende Rolle.

Daneben sind die nichtlineare Optik (bei der das Licht im Gegensatz zur *linearen Optik* das umgebende Medium beeinflusst und dadurch zusätzliche Effekte bewirkt) und die Fourieroptik von theoretischem und technischem Interesse. Ein interdisziplinärer Teilbereich ist die atmosphärische Optik, in der Leuchterscheinungen in der Erdatmosphäre untersucht werden.

Geometrische Optik

In der geometrischen Optik wird Licht durch idealisierte Strahlen angenähert. Der Weg des Lichtes, etwa durch ein optisches Instrument, wird durch Verfolgen des Strahlenverlaufs konstruiert. Das snelliussche Brechungsgesetz beschreibt die Brechung des Lichtes an Grenzflächen zwischen transparenten Medien mit verschiedener Brechzahl (an Oberflächen von Linsen oder Prismen). Bei Reflexion an Spiegeln und bei der Totalreflexion gilt die Regel, dass der Einfallswinkel dem Reflexionswinkel gleich ist. Mittels dieser Methode lassen sich Abbildungen, beispielsweise durch Linsen oder Linsensysteme (Mikroskop, Teleskop, Objektiv) und die dabei auftretenden Abbildungsfehler behandeln. Eine wichtige Näherung ist die paraxiale Optik, welche aus einer Linearisierung des Snelliusschen Brechungsgesetzes abgeleitet werden kann, und wichtige Begriffe wie Brennweite und Abbildungsmaßstab definiert.

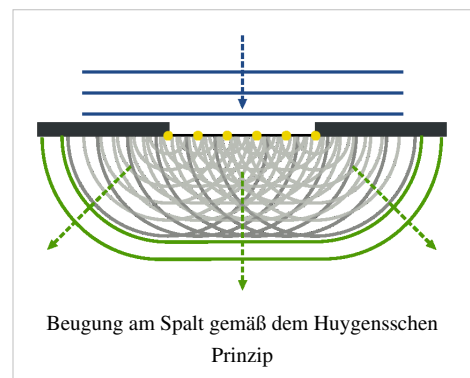


Wellenoptik

Als Wellenoptik wird der Bereich der Optik bezeichnet, der von der Wellennatur des Lichts handelt. Sie erklärt Phänomene, die durch die geometrische Optik nicht erklärt werden können, da bei ihnen die Welleneigenschaft des Lichtes relevant sind. Beispielsweise ist in der geometrischen Optik im Prinzip eine ideale Abbildung möglich, wohingegen die Wellenoptik zeigt, dass durch Beugungseffekte der Auflösung eine prinzipielle Grenze gesetzt ist; dies ist unter anderem bei fotolithografischen Prozessschritten bei der Herstellung moderner integrierter Schaltungen zu beachten. Wichtige Elemente der Wellenoptik sind:

- Interferenz zwischen einander überlagernden Wellenfronten.
- Beugung, die sich zeigt, wenn Licht sich durch kleine Spalten oder an Kanten entlang ausbreitet (Beugungsintegral).
- Polarisation des Lichts.
- Streuung des Lichts an Partikeln, die in dem Volumen, durch das das Licht fällt, verteilt sind.

Die Wellenoptik kann auch Effekte beschreiben, die von der Wellenlänge des Lichts abhängen; man spricht dabei allgemein von Dispersion. (Beispiel: „Warum ist der Himmel blau?“) Je nach oben genanntem Mechanismus müssen

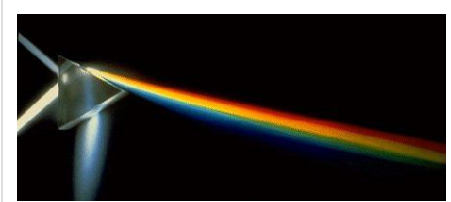


sehr verschiedene Modelle zur Beschreibung genutzt werden, die zu sehr unterschiedlichen Wellenlängenabhängigkeiten führen.

Auf der Wellenoptik bauen die Kristalloptik und die Magnetooptik auf.

Oberflächenphänomene

Die Wechselwirkung von Licht mit wirklichen (d. h. nicht idealisierten) Oberflächen ist für die optische Wahrnehmung des Menschen bedeutsam, ist aber bislang nur unvollständig verstanden. Bedeutsam ist die Remission, also die Absorption eines Teil des Lichts sowie die Reflexion, Transmission beziehungsweise Streuung des restlichen Spektralanteils. Reflexion und Transmission lassen sich durch die Brechung des Lichts an den Grenzflächen beschreiben. Wiederum ist eine Wellenlängenabhängigkeit der meisten Mechanismen zu beachten, also deren Dispersion.



Lichtbrechung im Prismenspektrometer;
Teilreflexion an beiden brechenden Flächen als
Nebeneffekt

Manche Oberflächen, wie etwa die menschliche Haut, sind in den obersten Hautschichten teilweise transparent, so dass optisch keine reflektierende Fläche, sondern eine reflektierende Schicht vorliegt. Eine abstrakte Beschreibung der optischen Vorgänge an derartigen Oberflächen ist kompliziert, und einer der Gründe, dass computergenerierte Bilder künstlich wirken können.

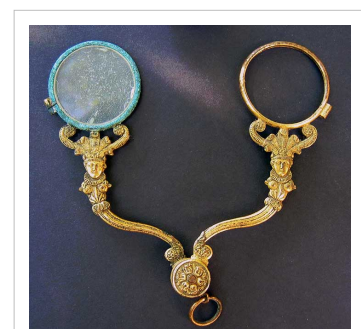
Das menschliche Auge

Das Auge ist das optische Sinnesorgan des Menschen, es wertet den Reiz von Licht unterschiedlicher Wellenlänge an den Photorezeptoren zu Aktionspotenzialfolgen der Ganglienzellen der Netzhaut aus. Die physiologische Optik befasst sich mit der Optik und dem Aufbau des Auges. In der Medizin spricht man bei der das Auge betreffenden Medizin von der Augenoptik oder Optometrie als der Messung der Sehweite. Der Vorgang des Sehens lässt sich mithilfe der Optik nur teilweise erklären. Das Gehirn spielt dabei eine große Rolle, denn es verarbeitet Informationen erst zu dem, was wir als Sehen bezeichnen. Dieser Teil fällt aber der Biologie zu. Alle durchsichtigen Teile des Auges wirken zusammen wie eine einzige Sammellinse und entwerfen ein stark verkleinertes, verkehrtes, wirkliches Bild.

Geschichte der Sehhilfen

Mit der Entstehungsgeschichte von Sehhilfen sind Linsen verbunden, die auf Gotland gefunden wurden. Die auf der Insel gefundenen bikonvexen, teilweise gefassten Bergkristall-Linsen gehören zu Wikingerschätzen des 11. oder 12. Jahrhunderts. Einige der in Fröjel gefundenen so genannten Visby-Linsen sind in Gotlands Fornsal, dem historischen Museum der Stadt Visby, ausgestellt.

Bei den gefassten Exemplaren besteht die Chance, dass die Fassung auf Gotland gefertigt wurde, während der geschliffene Kristall importiert wurde. M. Stenberger hält zumindest eine Fassung für gotländische Goldschmiedekunst. Die Verarbeitung von Bergkristall war bereits im 11. Jahrhundert weit verbreitet. Die Herkunft der gotländischen Linsen war aber trotz genauer Analyse nicht zu ermitteln. Die Handelsbeziehungen der schwedischen Wikinger konzentrierten sich auf den Handel mit dem Südosten Europas und Kleinasien. Nach Meinung von M. Stenberger wurden die



Französische Scherenbrille im
Empire-Stil um 1805

Linsen aus dem Orient in den Pontischen Raum gebracht, wo sie mit Silberfassungen versehen wurden. Von dort könnten sie von Mitgliedern der Waräger-Garde aus Byzanz nach Gotland verbracht worden sein. Bergkristalle

tauchten gegen Ende des 11. Jahrhunderts auf Gotland auf und verschwanden schnell wieder.

Einige Visby-Linsen haben optische Eigenschaften, die besser sind als die späterer sphärischer Lesesteine. Die Abbildungsqualität ist teilweise so gut, dass sich die vor rund 1000 Jahren gefertigten Linsen mit heutigen Linsen messen können.

Der arabische Gelehrte Ibn Al-Haitham (996–1038) schrieb über das Sehen, die Refraktion und die Reflexion in seinem Buch „Schatz der Optik“.^{[1] [2]} Um 1240 wurde das Buch ins Lateinische übersetzt. Genial war seine Überlegung, das Auge mit geschliffenen Linsen zu unterstützen. Europäische Mönche griffen diesen Gedanken auf und fertigten später als im Orient halbkugelige Plankonvexlinsen für Sehhilfen.

Technische Optik

Das Design, die Auslegung und die Fertigung optischer Systeme wird als *Technische Optik* bezeichnet und zählt im Unterschied zur physikalischen Optik zu den Ingenieurwissenschaften, da hier die konkrete Konstruktion und Herstellung optischer Geräte sowie die Konzeption spezifischer Strahlengänge im Vordergrund stehen. Bedeutende Vertreter dieser Fachrichtung waren unter anderen Johannes Kepler, Joseph von Fraunhofer und Ernst Abbe. Die heutige gewerbliche Berufsbezeichnung ist *Feinoptiker*.

Sie stellt eine inhaltliche Verknüpfung der Teilgebiete Optische Messtechnik, Lasertechnik und theoretische Optik (einschließlich Mikrooptik, Lichttechnik oder Faseroptik) dar. Im Folgenden sind die wichtigsten Bauelemente, Komponenten und Geräte aufgelistet.

Optische Bauelemente

- Strahlungsquelle
- Linse
- Fresnel-Zonenplatte
- Filter
- Planplatten
- Wellenplatte
- Spiegel
- Prisma
- Beugungsgitter
- Blende
- Empfänger: Projektionsfläche, Filmebene, Strahlungsdetektor

Optische Komponenten

- Kondensor
- Objektiv
- Fresnel-Linse
- Doppelprisma
- Ulbricht-Kugel

Sowie verschiedene aktive Komponenten: Modulatoren, spezielle Lichtquellen und optische Detektoren.

Optische Geräte

- Ophthalmometer
 - Lupe
 - Lesestein
 - Brillen
 - Fernrohr
 - Fernglas
 - Spektiv
-

- Mikroskop
- Spektroskop
- Laser
- Polarimeter
- Stereoskop
- Laserlink
- Polarisator
- Anomaloskop
- Kamera
- Refraktometer
- Lidar
- Tachymeter
- Teleskop

Anwendungen und Methoden

- Projektion
- Stereoskopie
- Holographie
- Fotografie

Bekannte Optiker

- | | |
|-------------------------|----------------------------------|
| • Ernst Abbe | • Johannes Kepler |
| • Alhazen | • Antoni van Leeuwenhoek |
| • Laurent Cassegrain | • Dmitri Dmitrijewitsch Maksutow |
| • John Dollond | • Isaac Newton |
| • Peter Dollond | • Josef Maximilian Petzval |
| • Benjamin Franklin | • Hermann Pistor |
| • Joseph von Fraunhofer | • Carl Pulfrich |
| • Hans-Joachim Haase | • Christoph Scheiner |
| • Hans Lipperhey | • Bernhard Schmidt |
| • Zacharias Janssen | • Ludwig Seidel |
| • Christiaan Huygens | • August Sonnfeld |

Siehe auch

- Visuelle Wahrnehmung, Optische Täuschung
- Brillouin-Streuung
- Opazität
- Tarnkappe

Literatur

- Friedrich Wilhelm Barfuß: *Populäres Lehrbuch der Optik, Katoptrik und Dioptrik*. 2. Auflage. 1860 (Digitalisat ^[3] in der Google Buchsuche).
- Ludwig Bergmann, Clemens Schaefer: *Optik*. 10. Auflage. De Gruyter, Berlin 2004, ISBN 3-11-017081-7 (*Lehrbuch der Experimentalphysik*. Band 3).
- Max Born, Emil Wolf: *Principles of Optics*. 7. Auflage. Cambridge University Press, Cambridge 1999, ISBN 0-521-64222-1.

- Heinz Haferkorn: *Optik*. 4. Auflage. Wiley-VCH, Weinheim 2003, ISBN 3-527-40372-8.
- Eugene Hecht: *Optik*. 4. Auflage. Oldenbourg, München 2005, ISBN 3-486-27359-0.
- Dietrich K hlke: *Optik*. 2. Auflage. Deutsch, Frankfurt am Main 2004, ISBN 3-8171-1741-8.

Einzelnachweise

- [1] Abu-'Ali Al-Hasan Ibn Al-Haytham: *Kitab-al-Manazir*. (deutsch: „Schatz der Optik“).
- [2] Ian P. Howard: *Basic Mechanisms*. Porteous, Toronto 2002, ISBN 0-9730873-0-7, S. 16 ff. (*Seeing in Depth*. Band 1).
- [3] <http://books.google.de/books?id=9TN7hRaxPwQC>

Orange (Farbe)

Orange

Orange (altdeutsch auch *kre *^[1]) ist der Farbreiz, der wahrgenommen wird, wenn Licht mit einer spektralen Verteilung ins Auge fällt, bei der das Maximum im Wellenlängenintervall zwischen 575 und 595 nm liegt. Licht mit dieser Eigenschaft kann auch als Körperfarbe remittiert sein.

Etymologie

Die Farbe **Orange** (frz. [o'ʀɑːʒ], in Deutschland auch [o'ʀaŋʃ]), wurde nach der Zitrusfrucht Orange benannt. Der Zwischenton von Gelb zu Rot ist mithin erst mit allgemeiner Verbreitung der S dfrucht zum anerkannten Farbnamen geworden. Goethe schreibt an seinen Farbkreis *gelbroth* und *rothgelb* und bezeichnet die Wirkung als „edel“.^[2] Auch kennt er noch das altdeutsche Wort für die Farbe Orange: *kre *, das sich von der Farbe der Kapuzinerkresse herleitet.

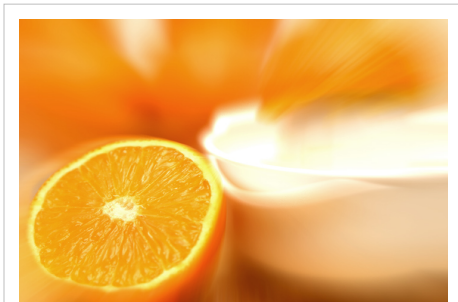
Beim Adjektiv „orange“ werden im Deutschen neben der undeklinierten Form und Umschreibungen wie *orangefarben* mittlerweile auch die deklinierten akzeptiert.^[3] So etwa bei: ein oranger/orangefarbener Hut, eine orange/orangefarbene Mütze, ein oranges/orangefarbenes Hemd. Umgangssprachlich sind die gebeugten Formen orangener, orangene, orangenes verbreitet, dies gilt in der Schriftsprache als nicht korrekt.

Farblehre

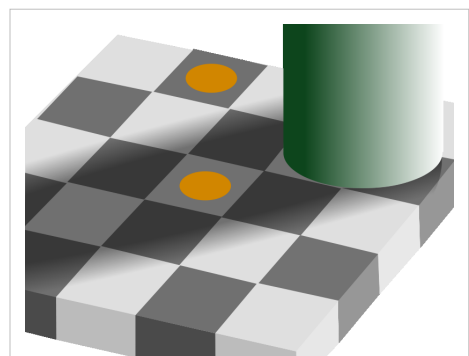
Orange ist in der additiven Farbmischung das Ergebnis der Addition der sekundären Grundfarbe Gelb und der Primärfarbe Rot und gilt so schon als Tertiärfarbe. Dies ist die Farbmischung der Lichtfarbe. Das genutzte Rot sollte als Grundfarbe schon ein Orangerot sein. Für Körperfarben lässt sich Orange entsprechend aus einem roten und einem gelben Farbmittel im geeigneten Verhältnis ermischen.

Ein Orange mit geringer relativer Helligkeit wird als Braun bezeichnet. Dabei spielt, wie das Bild zeigt, die relative Helligkeit der Umgebung der Farbfläche eine wichtige Rolle.

Bei der Darstellung von Farben in Webbrowsern lassen sich orange Töne innerhalb des RGB-Farbraumes darstellen. Die Verwendung des Farbnamens „orange“ im HTML als Webfarbe zeigt diesen Farbton, gleichberechtigt dazu ist die Verwendung von $RGB = \{255,165,0\}$ in Dezimal- oder FFA500 in Hexadezimaldarstellung.



Die Frucht: Orange

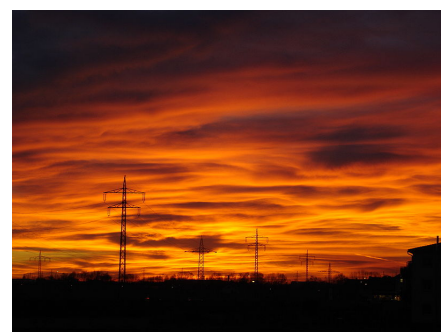


Beide Farbflächen sind in $RGB = \{209,134,00\} \approx$ orange, der Eindruck „Braun“ entsteht durch das umgebende Grau.

Psychologie

Die Farbe wird in ihren Tönungen für Erfrischung, Fröhlichkeit und Jugend gesetzt. Sie steht so für Freude, aber auch Reife.

- Orange gilt in der Psychologie als stimmungsaufhellend, stimulierend und wird mit Lust verbunden.
- In Kombination mit Terrakotta-Tönen betont es einen „mediterranen“ Stil, wirkt belebend und optimistisch.
- In der Tiefenpsychologie steht es für Kommunikation und den Wunsch nach Einheit.



Orangetöne beim Sonnenuntergang

Signalfarbe

Orange ist eine Warnfarbe, sie wird im Straßenverkehr und in der Gefahrengutkennzeichnung (Gefahrensymbole) eingesetzt. Die mit „Reinorange“ bezeichnete RAL-Farbe hat die Farbnummer RAL 2004 und die RGB-Koordinaten R = E7, G = 5B und B = 12. Es ist die Farbe des Katastrophenschutzes. Orange ist durch den Rotstich auffälliger als ein bloßes Gelb.

Religion

Im Buddhismus ist Orange eine präzente Farbe. Die Gewänder der Mönche sind in dieser Farbe gehalten. Im tantrisch geprägten Kulturkreis Indiens steht es für selbstlosen Dienst, Mönchtum und Entsagung. Orange ist in Nordirland ein Zeichen für den Protestantismus, begründet im Oranier-Orden. Die Farbe wurde unter anderem als Zeichen der protestantischen Kirchen beim deutschen evangelischen Kirchentag 2007 verwendet.

Im tantrischen Hinduismus, im tantrisch-buddhistischen Vajrayana, im Yoga, in der Traditionellen Chinesischen Medizin (TCM) und in einigen esoterischen Lehren werden die postulierten subtilen Energiezentren zwischen dem Körper und dem subtilen Körper des Menschen als Chakren bezeichnet. Die Farbe Orange wird mit ihrer Frequenz dabei dem zweiten, dem Sakralchakra zugeschrieben.



Einkleidung von jungen Mönchen im Buddhismus

Design

In den 1970er Jahren war Orange eine Modefarbe. Die Orangetöne gelten als mediterran.

Kampfsport

In vielen Kampfkünsten, wie Jiu Jitsu, Judo und Karate, wird ein Gürtel (jap. Obi) als Teil der Kampfsportkleidung (jap. Keikogi) getragen. Der orangefarbene Gurt repräsentiert den Kenntnisstand des Budoka und ist den unteren Schülergraden (jap. Kyu-Grad) vorbehalten.



Budo-Gürtel (jap. Obi) in den Farben der fünf Schülergrade(jap. Gokyū)

Politik

In den Niederlanden ist die Farbe das Symbol des Königshauses Oranien und die Trikotfarbe der Fußball-Nationalmannschaft („Oranjeheerden“).

Bei den Präsidentschaftswahlen in der Ukraine 2004 kam es wegen dabei aufgetretener Fälschungen zur sogenannten „Orangefarbene Revolution“, die schließlich am 26. Dezember 2004 zu einer Wahlwiederholung und zum Sieg des vormals unterlegenen Kandidaten Wiktor Juschtschenko führte.

Aufgrund der psychologischen Bedeutung der Farbe Orange nutzt die Ärztegewerkschaft Marburger Bund diese in ihrem Corporate Design und auch andere Gewerkschaften bei ihren Protestaktionen (Mützen, Luftballons). Die Ökologisch-Demokratische Partei sowie die Piratenpartei Deutschland nutzen Orange als Kennfarbe. Das Bündnis Zukunft Österreich entschied sich ebenfalls für Orange als Parteifarbe.

Literatur

- Sabine Weißler (Hrsg.): *Mein Orange. Mehr als eine Generationenfarbe*. Jonas, Marburg 2006, ISBN 3-89445-373-7

Einzelnachweise

- [1] Vgl. *Duden - Etymologie. Herkunftswörterbuch der deutschen Sprache*. dort den Eintrag *Kresse*.
- [2] Goethe: *Schriften zur Farbenlehre*. Vierter Band. Didaktischer Teil und Tafeln. Hermann Böhlau, Weimar 1973.
- [3] Duden-Newsletter vom 12. August 2005 (http://www.duden.de/deutsche_sprache/sprachberatung/newsletter/archiv.php?id=122#gewusst)



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Photon

Photon	
Klassifikation	
Elementarteilchen Boson Eichboson	
Eigenschaften	
Ladung	neutral
Masse	0 kg 0 eV/c ²
Spin	1
Wechselwirkung	elektromagnetisch

Das **Photon** (von Griechisch $\varphi\omega\varsigma$ *phōs*, Gen. $\varphi\omega\tau\acute{o}\varsigma$ *phōtos* „Licht“) ist die elementare Anregung (Quant) des quantisierten elektromagnetischen Feldes. Anschaulich gesprochen sind Photonen das, woraus elektromagnetische Strahlung besteht, daher wird in der Laiensprache auch der Begriff „Lichtteilchen“ verwendet. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass alle Teilchen einschließlich der Photonen auch Welleneigenschaften besitzen. Diese Tatsache wird durch den Welle-Teilchen-Dualismus beschrieben. In der Quantenelektrodynamik, dem ältesten Teil des Standardmodells der Teilchenphysik, gehört das Photon als Vermittler der elektromagnetischen Wechselwirkung zu den Eichbosonen.

Forschungsgeschichte

Seit der Antike gab es verschiedene, oft einander widersprechende Vorstellungen über die Natur des Lichts. Im 19. Jahrhundert konkurrierten Wellen- und Teilchentheorien. Während viele Phänomene wie Interferenz- und Polarisationserscheinungen für eine Wellennatur des Lichts sprachen, gab es auch Indizien für einen Teilchencharakter. Ein historisch sehr wichtiges Experiment, welches auf eine Teilchennatur des Lichts hinwies, war im Jahre 1887 die Beobachtung des Photoelektrischen Effekts durch Heinrich Hertz und Wilhelm Hallwachs.

Die Quantisierung der elektromagnetischen Strahlung geht letztendlich auf die Erklärung der Schwarzkörperstrahlung durch Max Planck im Jahr 1900 zurück (plancksches Strahlungsgesetz). Planck selbst stellte sich allerdings nicht die elektromagnetische Strahlung an sich quantisiert vor, sondern erklärte die Quantisierung damit, dass die Oszillatoren in den Wänden der Schwarzkörperresonatoren nur diskrete Energiemengen mit dem elektromagnetischen Feld austauschen können.

Albert Einstein stellte 1905 in seiner Publikation zum photoelektrischen Effekt die **Lichtquantenhypothese** auf, nach der die Energie des Lichts in zur Frequenz proportionalen Einheiten gequantelt ist. Für diese Arbeit wurde er 1921 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Die formale Quantentheorie des Lichtes wurde erst seit 1925 beginnend mit Arbeiten von Max Born, Pascual Jordan und Werner Heisenberg entwickelt. Die bis heute gültige Theorie der elektromagnetischen Strahlung, welche auch die Lichtquanten beschreibt, die Quantenelektrodynamik (QED), geht in ihren Anfängen auf eine Arbeit von Paul Dirac im Jahr 1927 zurück, in der er die Wechselwirkung von quantisierter elektromagnetischer Strahlung mit einem Atom beschreibt. Die QED wurde in den 1940er Jahren entwickelt und 1965 mit der Verleihung des Nobelpreises für Physik an Richard P. Feynman, Julian Schwinger und Shinichirō Tomonaga gewürdigt.

Der Begriff *Photon* wurde 1926 durch den Chemiker Gilbert Newton Lewis in einem Aufsatz in Nature für die elementare Anregung des quantisierten elektromagnetischen Feldes eingeführt.^[1] Er verwandte den Begriff im

Rahmen eines von ihm vorgeschlagenen (und allgemein nicht anerkannten) Modells der Wechselwirkung von Atomen mit Licht.

In einem Brief an Michele Besso (1873–1955) schrieb Albert Einstein im Jahr 1951: *„Die ganzen 50 Jahre bewusster Grübeleien haben mich der Antwort der Frage ‚Was sind Lichtquanten‘ nicht näher gebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich...“*

Symbol

Für das Photon wird im allgemeinen das Symbol γ (gamma) verwendet. In der Hochenergiephysik ist dieses Symbol allerdings reserviert für die hochenergetischen Photonen der Gammastrahlung (Gamma-Quanten) und die in diesem Zweig der Physik ebenfalls relevanten Röntgenphotonen erhalten das Symbol X (von Englisch: *X-ray*). Sehr oft wird ein Photon auch durch die enthaltene Energie mit $h\nu$ oder $\hbar\omega$ dargestellt. Darin sind h das Plancksche Wirkungsquantum und ν die (Licht-)Frequenz, in der zweiten Schreibweise sind $\hbar = h/(2\pi)$ und $\omega = 2\pi\nu$ die Kreisfrequenz.

Eigenschaften

Jegliche elektromagnetische Strahlung, von Radiowellen bis zur Gammastrahlung, ist in Photonen quantisiert. Das bedeutet, die kleinste Menge an elektromagnetischer Strahlung beliebiger Frequenz ist ein Photon. Photonen haben eine unendliche natürliche Lebensdauer, können aber bei einer Vielzahl physikalischer Prozesse erzeugt oder vernichtet werden. Ein Photon befindet sich nie in Ruhe, sondern bewegt sich immer mit Lichtgeschwindigkeit c . Daraus folgt, dass es keine Ruhemasse besitzen kann. In optischen Medien ist die Gruppengeschwindigkeit im Vergleich zur Vakuumlichtgeschwindigkeit aufgrund der Wechselwirkung der Photonen mit der Materie (ausgedrückt durch die Brechzahl n) verringert, die Phasengeschwindigkeit kann sogar höher als c liegen.

Erzeugung und Detektion

Photonen können auf vielerlei Arten erzeugt werden, insbesondere durch Übergänge („Quantensprünge“) von Elektronen zwischen verschiedenen Zuständen (z. B. verschiedenen Atom- oder Molekülorbitalen oder Energiebändern in einem Festkörper). Photonen können auch bei nuklearen Übergängen, Teilchen-Antiteilchen-Vernichtungsreaktionen (Annihilation) oder durch beliebige Fluktuationen in einem elektromagnetischen Feld erzeugt werden.

Zum Nachweis von Photonenströmen können unter anderem Photomultiplier, Photoleiter oder Photodioden verwendet werden. CCDs, Vidicons, PSDs, Quadrantendioden oder Foto-Platten und Filme werden zur ortsauflösenden Detektion von Photonen benutzt. Im IR-Bereich werden auch Bolometer eingesetzt. Photonen im Gammastrahlen-Bereich können durch Geigerzähler einzeln nachgewiesen werden. Photomultiplier und Avalanche-Photodioden können auch zur Einzelphotonendetektion im optischen Bereich verwendet werden, wobei Photomultiplier im Allgemeinen die niedrigere Dunkelzählrate besitzen, Avalanche-Photodioden aber noch bei niedrigeren Photonenenergien bis in den IR-Bereich einsetzbar sind.

Masse

Im Standardmodell der Elementarteilchenphysik wird für die Ruhemasse m_0 eines Photons der Wert Null angenommen. Dies manifestiert sich in den Maxwellgleichungen dadurch, dass die Komponenten des Elektrischen Feldes im Vakuum die dispersionsfreie homogene Wellengleichung

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_i}{\partial t^2} - \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial^2 E_i}{\partial x_i^2} \right) = \square E_i = 0$$

erfüllen. Diese Wellengleichung ist der Spezialfall der Klein-Gordon-Gleichung für masselose Felder bzw. Teilchen. Die Phasengeschwindigkeit c ist dabei die Lichtgeschwindigkeit.

Ferner lässt die Gestalt der Maxwellgleichungen zu, elektrische und magnetische Potentiale (Eichfelder) zu definieren. Für Wechselwirkungsteilchen mit nicht verschwindender Masse ergäbe sich dann kein Coulomb-Potential, sondern ein Yukawa-Potential. Das Potential einer elektrischen Ladung wäre also mit einem zusätzlichen exponentiellen Dämpfungsterm abgeschwächt.

Weiterhin würde eine Photonmasse das Verhalten von Magnetfeldern ändern. Solche Abweichungen konnten bislang nicht experimentell nachgewiesen werden, woraus sich die momentan (Stand 2009) bestehenden Obergrenzen für die Photonmasse ergeben^[2].

Umgekehrt kann man auch aus der relativistischen Energie-Impuls-Relation $E = \sqrt{(m_0 c^2)^2 + (pc)^2}$ für $m_0 = 0$ sofort sehen, dass masselose Teilchenbahnen lichtartig sind:

$$v = \frac{dE}{dp} = \frac{d(pc)}{dp} = c$$

In der Quantenmechanik wird dem Photon der Energiewert $E = h\nu$ zugeordnet, wo h das Plancksche Wirkungsquantum und ν seine Frequenz ist.

Spin

Photonen sind Spin-1-Teilchen und somit Bosonen. Es können also beliebig viele Photonen denselben quantenmechanischen Zustand besetzen, was zum Beispiel in einem Laser realisiert wird.

Während etwa der Elektronenspin parallel oder antiparallel zu einer *beliebig* vorgegebenen Richtung ist^[3], kann der Photonspin wegen fehlender Ruhemasse nur parallel oder antiparallel zur *Flugrichtung* orientiert sein. Die Helizität des Photons ist daher eine charakteristische Größe. Dennoch kann auch ein einzelnes Photon *linear* polarisiert werden, indem zwei entgegengesetzt *zirkular* polarisierte Zustände überlagert werden.

Photonen im Vakuum

Im Vakuum bewegen sich Photonen mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit $c = 299.792.458$ m/s. Die Dispersionsrelation, d. h. die Abhängigkeit der Energie E von der Frequenz ν (ny), ist linear, und die Proportionalitätskonstante ist das Plancksche Wirkungsquantum h ,

$$E = pc = h\nu.$$

Zahlenwerte, wie sie in optischen Spektren typischerweise auftreten, können wie folgt ermittelt werden:

$$E = \hbar\omega = (6,582\,119\,15 \cdot 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}) \cdot \omega, \quad E \text{ dabei in eV (Elektronenvolt), } \omega \text{ in s}^{-1} \text{ (Kreisfrequenz), } 1 \text{ eV entspricht etwa einem } \omega \text{ von } 1,520 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda = (1,239\,841\,939 \text{ eV} \mu\text{m}) / \lambda, \quad E \text{ dabei in eV (Elektronenvolt), } \lambda \text{ in } \mu\text{m} \text{ (Wellenlänge), } 1 \text{ eV entspricht etwa } 1,240 \mu\text{m} = 1240 \text{ nm}$$

Beispiel: Rotes Licht mit 620 nm Wellenlänge hat eine Photonenenergie von 2 eV.

Der Impuls p eines Photons beträgt damit

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Photonen in Medien

In einem Material wechselwirken Photonen mit dem sie umgebenden Medium, woraus sich veränderte Eigenschaften ergeben. Das Photon kann absorbiert werden, wobei seine Energie natürlich nicht verschwindet, sondern in elementare Anregungen (Quasiteilchen) des Mediums wie Phononen oder Exzitonen übergeht. Möglich ist auch, dass es sich durch ein Medium ausbreitet. Im Teilchenbild existiert kein gleichmäßiges Medium, sondern eine Abfolge von Streuprozessen des Photons an den Atomen des Mediums. Diese Ausbreitung kann man durch die Einführung eines Quasiteilchens, dem Polariton, beschreiben. Diese elementaren Anregungen in Materie haben üblicherweise keine lineare Dispersionsrelation, und ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit ist niedriger als die Vakuumlichtgeschwindigkeit bis hin zu nur einigen Metern pro Sekunde für spezielle Materialien.

Wechselwirkung von Photonen mit Materie

Photonen, die auf Materie treffen, lösen bei bestimmten Energien unterschiedliche Prozesse aus. Im Folgenden sind für verschiedene Prozesse die Energiebereiche angegeben, in denen sie relevant sind:

- unter 1 eV Anregung höherer energetischer Zustände von Elektronen, keine Ionisation
- 1 eV bis 100 keV Photoeffekt,
- 50 keV bis 1 MeV Compton-Effekt,
- 1,022 bis 6 MeV Paarbildung,
- 2,18 bis 16 MeV Kernphotoeffekt.
- höhere Energien: Photodesintegration

Diese Effekte tragen maßgeblich dazu bei, dass man diese Strahlung detektieren kann und sich bestimmte Stoffe mit bestimmten Effekten anhand der Gammaspektroskopie nachweisen lassen.

Literatur

- Chandrasekhar Roychoudhuri, Rajarshi Roy: *The nature of light: What is a photon?* In: *Optics and Photonics News*. 14, Nr. 10, 2003, ISSN 1047-6938 ^[4], Supplement, S. 49–82.
- Harry Paul: *Photonen: Eine Einführung in die Quantenoptik*. 2. Auflage. Teubner, Stuttgart 1999, ISBN 3-519-13222-2. (Teubner-Studienbücher Physik)
- Klaus Hentschel: *Einstein und die Lichtquantenhypothese*. In: *Naturwissenschaftliche Rundschau*. 58(6), 2005, ISSN 0028-1050 ^[4], S. 311–319.
- Liang-Cheng Tu, Jun Luo, George T. Gillies: *The mass of the photon*. In: *Reports on Progress in Physics*. 68, Nr. 1, 2005, doi:10.1088/0034-4885/68/1/R02 ^[5], S. 77–130.

Weblinks

- Welt der Physik ^[6] zur Welle-Teilchen-Natur des Lichts
- HydrogenLab ^[7] 3D Animationen von atomaren Übergängen: Absorption und Emission von Photonen (semiklassisch)
- QuantumLab ^[10] Experimente mit einzelnen Photonen: Beweis der Existenz, Quantenzufall, Verschränkung,...

Einzelnachweise

- [1] Gilbert N. Lewis: *The Conservation of Photons*. In: *Nature*. 118, Nr.2981, 1926, S. 874–875, doi: 10.1038/118874a0 (<http://dx.doi.org/10.1038/118874a0>).
- [2] Particle Data Group, Eigenschaften des Photons PDF (<http://pdg.lbl.gov/2008/listings/s000.pdf>)
- [3] Siehe z. B. pro-physik.de (<http://www.pro-physik.de/Phy/leadArticle.do?laid=10053>) über *Spin-Hall-Effekt jetzt auch mit Photonen*
- [4] <http://dispatch.opac.d-nb.de/DB=1.1/CMD?ACT=SRCHA&IKT=8&TRM=1047-6938>
- [5] <http://dx.doi.org/10.1088%2F0034-4885%2F68%2F1%2FR02>
- [6] <http://www.weltderphysik.de/de/1487.php>
- [7] <http://www.hydrogenlab.de>

Photopisches Sehen

Photopisches Sehen oder **Tagsehen** bezeichnet das Sehen des Menschen bei ausreichender Helligkeit, wobei Farben wahrgenommen werden. Im Gegensatz dazu steht das **skotopische Sehen** bei geringer Helligkeit (**Nachtsehen**, keine Farbwahrnehmung) und dem Übergangsbereich, dem **mesopischen Bereich (Dämmerungssehen)**. Die Wörter sind vom Griechischen abgeleitet, phos (Licht), mesos (Mitte), und skotos (Dunkelheit).

Fotorezeptoren im menschlichen Auge für das photopische Sehen sind die Zapfen der Netzhaut, hingegen sind die wesentlich lichtempfindlicheren Stäbchen für das skotopische Sehen zuständig. Im mesopischen Bereich tragen sowohl Zapfen als auch Stäbchen zur Bildwahrnehmung bei.

Da die Stäbchen blauempfindlicher als die Zapfen sind und daher einen anderen Eindruck der Helligkeit verschiedener Farben als die Zapfen vermitteln (siehe V-Lambda-Kurve und Purkinje-Effekt), kommt es dabei zu einer geänderten Farbwahrnehmung, die vor allem in der Dämmerung merkbar ist, sobald die Dunkeladaption einsetzt. Vor allem manche Blautöne erscheinen wesentlich leuchtender. Daher wird oft in künstlerischen Darstellungen oder auch bei der Beleuchtung für Film- und Fernsehaufnahmen, die Nachtstimmung hervorrufen sollen, ein hoher Anteil blauer Farbschattierungen verwendet. Dieser Trick wird „amerikanische Nacht“ genannt. Aus demselben Grund erscheint Mondlicht "kälter" (bläulicher) als Sonnenlicht, obwohl es eigentlich geringfügig rötlicher ist.

Die Sehschärfe ist beim photopischen Sehen am größten, vor allem im Bereich der Fovea centralis nahe der Mitte der Netzhaut. Beim skotopischen Sehen ist die Schärfe geringer; vor allem können Details mit geringem Kontrast nicht mehr wahrgenommen werden, weil das Auge die Helligkeit über benachbarte Stäbchen interpoliert. Da im Bereich der Fovea centralis keine Stäbchen vorhanden sind, muss das Objekt beim skotopischen Sehen außerhalb der Fovea centralis sein (parafoveales Sehen), man muss also „danebenschauen“, um die beste Empfindlichkeit des Auges zu erreichen. Außerdem sind die Stäbchen zeitlich träger als die Zapfen (siehe Pulfrich-Effekt).

Der skotopische Bereich reicht von der Wahrnehmungsschwelle bei einer Leuchtdichte von etwa $3 \cdot 10^{-6} \text{ cd/m}^2$ bis etwa $0,003 \text{ bis } 0,03 \text{ cd/m}^2$, darüber liegt der mesopische Bereich, der bis etwa $3 \text{ bis } 30 \text{ cd/m}^2$ reicht (die Grenzen sind fließend und individuell verschieden). Bei Leuchtdichten über $3 \text{ bis } 30 \text{ cd/m}^2$ tritt photopisches Sehen auf.

Literatur

- Achim Freiding: *Untersuchungen zur spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges im mesopischen Bereich*, Herbert Utz Verlag, München 2010, ISBN 978-3-8316-0991-8

Siehe auch

- Visuelle Wahrnehmung
- Helligkeitsempfindlichkeit des menschlichen Auges

Physik

Die **Physik** (von altgriechisch φυσική *physikē* ‚wissenschaftliche Erforschung der Naturerscheinungen‘, ‚Naturforschung‘; lateinisch *physica* ‚Naturlehre‘)^{[1] [2]} untersucht die grundlegenden Phänomene in der Natur in der Absicht deren Eigenschaften und Verhalten anhand von quantitativen Modellen und Gesetzmässigkeiten zu erklären. Sie befasst sich insbesondere mit Materie und Energie und deren Wechselwirkungen in Raum und Zeit.

Die Arbeitsweise der Physik besteht im Allgemeinen in einem Zusammenspiel experimenteller Methoden und theoretischer Modellbildung, welche weitgehend mathematische Methoden verwendet. Physikalische Theorien bewähren sich in der Anwendbarkeit auf Systeme der Natur, indem sie bei Kenntnis von Anfangszuständen derselben möglichst genaue Vorhersagen über resultierende Endzustände erlauben. Physikalische Fortschritte bestehen in der Bereitstellung von Theorien und Hilfsmitteln, die auf zusätzliche Systeme anwendbar sind, genauere Beschreibungen ermöglichen, eine Vereinfachung des theoretischen Apparats erlauben oder praktische Anwendungen ermöglichen und erleichtern.

Alle naturwissenschaftlich erforschbaren Prozesse beruhen auf physikalischen Prozessen. In unterschiedlichem Maße sind neben den übrigen Naturwissenschaften auch angewandte Wissenschaften wie die Medizin oder Gebiete der Ingenieurwissenschaft bzw. Technik von der Physik abhängig. Die Rekonstruktion der Arbeitsweise der Physik ist ein Gegenstand der Wissenschaftstheorie; Analysen über die Aussagereichweite naturwissenschaftlicher Erkenntnis im Allgemeinen diskutiert die sich mit ersterer überschneidende Epistemologie, die Interpretation physikalischer Theorien hinsichtlich ihrer Einengung möglicher Strukturbeschreibungen der Realität ist Gegenstand der modernen Naturphilosophie als Teilgebiet der Ontologie.

Geschichte von Begriff und Disziplin der Physik

Die heutige Disziplin der Physik hat ihre Ursprünge in den Theorien und Einzelstudien antiker Wissenschaftlicher. Zwar wird die Physik hier als ein Teilgebiet der Philosophie verstanden; sie hat aber, etwa in der maßgeblichen Systematik und Durchführung bei Aristoteles, einen eigenständigen Erkenntnisbereich und eine methodische Selbständigkeit. Mitte des 13. und im Laufe des 14. Jh. plädieren mehrere Philosophen und Naturforscher – meist in Personalunion – für eine größere Eigenständigkeit der Naturerkenntnis; – eine Entwicklung, die sich in der Tat nicht aufhalten ließ und, in Aufnahme dieser Tendenzen, im 16. und 17. Jh. in die Entwicklung einer Methodologie der physikalischen Erkenntnis mündet, die modernen Kriterien an experimentelle Standards nahe kommt, namentlich mit Galileo Galilei und Isaac Newton.

Damit etabliert sich die Physik endgültig als eigenständige Disziplin hinsichtlich ihrer Methode, ihres Gegenstandsbereichs, ihrer wissenschaftssystematischen und institutionellen Verortung. Diese neue Methodik teilt die Physik im Wesentlichen in zwei große Gebiete auf. Die *theoretische Physik* beschäftigt sich vorwiegend mit formellen Beschreibungen und den Naturgesetzen. Sie abstrahiert Vorgänge und Erscheinungen in der wirklichen Natur in Form eines Systems von Modellen, allgemein gültigen Theorien und Naturgesetzen sowie intuitiv gewählter Hypothesen. Bei der Formulierung von Theorien und Gesetzen bedient sie sich vielfach der Methoden der

Mathematik und der Logik. Ziel dieser Betrachtung ist die Vorhersage des Verhaltens eines Systems sowie die experimentelle Prüfung der Gültigkeit und Vorhersagekraft der gewählten Hypothesen durch Vergleich des vorhergesagten Verhaltens mit den Vorgängen und Erscheinungen in der wirklichen Natur. Diese Überprüfung in Form reproduzierbarer Messungen oder durch Beobachtung natürlicher Phänomene macht das Teilgebiet der *Experimentalphysik* aus.

Die Physik steht in enger Verbindung zu den Ingenieurwissenschaften und den meisten Naturwissenschaften von der Astronomie und Chemie bis zur Biologie und den Geowissenschaften. Die Abgrenzung zu diesen Wissenschaften ergibt sich historisch aus dem Ursprung der Physik in der Philosophie. Insbesondere mit dem Aufkommen neuer Wissenschaftsdisziplinen wird eine inhaltliche Abgrenzung der Physik zu diesen anderen Feldern jedoch erschwert. Die Physik wird häufig als grundlegende oder fundamentale Naturwissenschaft aufgefasst, die sich stärker als die anderen Naturwissenschaften mit den Grundprinzipien befasst, die die natürlichen Vorgänge bestimmen.

In der heutigen Physik ist vor allem die Grenze zur Chemie, der Übergang von der Physik der Atom- und Molekülphysik, zur Quantenchemie, fließend. Allerdings konzentriert sich die Chemie häufig auf komplexere Strukturen (Moleküle), während die Physik meist die grundlegende Materie erforscht. Zur Abgrenzung gegenüber der Biologie wird die Physik oftmals als die Wissenschaft von der unbelebten Natur bezeichnet, womit jedoch eine Beschränkung impliziert wird, die so in der Physik nicht existiert. Die Ingenieurwissenschaften werden durch ihren Bezug zur praktischen Anwendung von der Physik abgegrenzt, da in der Physik das Verständnis der grundlegenden Mechanismen gegenüber der Anwendung im Vordergrund steht. Die Astronomie hat keine Möglichkeit Laborexperimente durchzuführen und ist daher allein auf Naturbeobachtung angewiesen, was zur Abgrenzung gegen die Physik herangezogen wird.

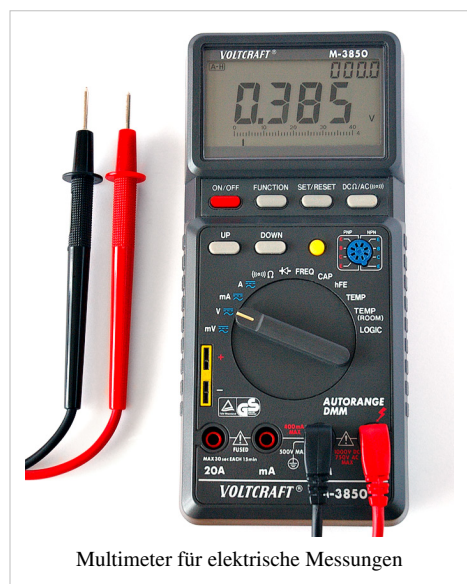
Methodik der Physik

Der Prozess der Erkenntnisgewinnung in der Physik verläuft in enger Verzahnung von Experiment und Theorie, besteht also aus empirischer Datengewinnung und -auswertung *und* gleichzeitig dem Erstellen theoretischer Modelle zu ihrer Erklärung. Dennoch haben sich im Verlauf des 20. Jahrhunderts Spezialisierungen herausgebildet, die insbesondere die professionell betriebene Physik heute prägen. Demnach lassen sich grob *Experimentalphysik* und *theoretische Physik* voneinander unterscheiden.

Experimentalphysik

Während manche Naturwissenschaften wie etwa die Astronomie und die Meteorologie sich methodisch weitgehend auf die Beobachtungen ihres Untersuchungsgegenstandes beschränken müssen, steht in der Physik das Experiment im Vordergrund. Dabei versucht die Experimentalphysik durch Entwurf, Aufbau, Durchführung und Auswertung von Experimenten Gesetzmäßigkeiten in der Natur aufzuspüren und mittels empirischer Modelle zu beschreiben. Sie versucht einerseits physikalisches Neuland zu betreten, andererseits überprüft sie von der theoretischen Physik gemachte Vorhersagen.

Grundlage eines physikalischen Experimentes ist es, die Eigenschaften eines zuvor präparierten physikalischen Systems, zum Beispiel eines Teilchenbeschleunigers, einer Vakuumkammer mit Detektoren oder eines geworfenen Steins durch Messung in Zahlenform auszudrücken, etwa als Länge einer Teilchenspur, Impulshöhe eines elektrischen Spannungspulses oder als Aufprallgeschwindigkeit.



Multimeter für elektrische Messungen

Konkret werden entweder nur die zeitunabhängigen (*statischen*) Eigenschaften eines Objektes gemessen oder es wird die zeitliche Entwicklung (*Dynamik*) des Systems untersucht, etwa indem Anfangs- und Endwerte einer Messgröße vor und nach dem Ablauf eines Vorgangs bestimmt werden oder indem kontinuierliche Zwischenwerte festgestellt werden.

Theoretische Physik

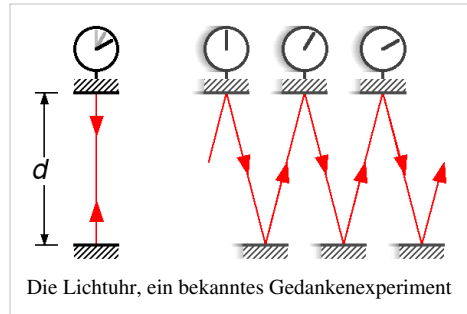
Die Aufgabe der theoretischen Physik wiederum besteht darin, die empirischen Modelle der Experimentalphysik mathematisch auf bekannte Grundlagentheorien zurückzuführen oder, falls dies nicht möglich ist, Hypothesen für eine neue Theorie zu entwickeln, die dann experimentell überprüft werden können. Sie leitet weiterhin aus bereits bekannten Theorien empirisch überprüfbare Voraussagen ab.

Bei der Entwicklung eines Modells wird grundsätzlich die Wirklichkeit idealisiert; man konzentriert sich zunächst nur auf ein vereinfachtes Bild, um dessen Aspekte zu überblicken und zu erforschen; nachdem das Modell für diese Bedingungen ausgereift ist, wird es weiter verallgemeinert.

Zur theoretischen Beschreibung eines physikalischen Systems benutzt man die Sprache der Mathematik. Seine Bestandteile werden dazu durch mathematische Objekte wie zum Beispiel Skalare oder Vektoren repräsentiert, die in durch Gleichungen festgelegten Beziehungen zueinander stehen. Der Zweck des Modelles ist es, aus bekannten Größen unbekannte zu errechnen und damit zum Beispiel das Ergebnis einer experimentellen Messung vorherzusagen. Diese auf Quantitäten konzentrierte Sichtweise unterscheidet die Physik maßgeblich von der Philosophie und hat zur Folge, dass nicht quantifizierbare Modelle, wie das Bewusstsein nicht als Teil der Physik betrachtet werden.

Das fundamentale Maß für den Erfolg einer Theorie ist, wie in vielen Naturwissenschaften auch, die Übereinstimmung mit reproduzierbaren Experimenten. Durch den Vergleich mit dem Experiment lässt sich der Gültigkeitsbereich und die Genauigkeit einer Theorie ermitteln, allerdings lässt sie sich niemals „beweisen“. Um eine Theorie zu widerlegen, bzw. um die Grenzen ihres Gültigkeitsbereiches zu demonstrieren, genügt im Prinzip ein einziges Experiment, sofern es reproduzierbar ist.

Experimentalphysik und theoretische Physik stehen also in steter Wechselbeziehung zueinander. Es kann allerdings vorkommen, dass Ergebnisse der einen Disziplin der anderen vorausseilen: So sind derzeit viele Voraussagen der Stringtheorie nicht experimentell überprüfbar; andererseits sind viele teilweise extrem genau gemessene Werte aus dem Gebiet der Kernphysik zum heutigen Zeitpunkt (2009) durch die zugehörige Theorie, die Quantenchromodynamik, nicht berechenbar.



Während bei der Veröffentlichung der Allgemeinen Relativitätstheorie 1916 nur die Periheldrehung des Merkur einen Hinweis auf die Richtigkeit gab, gehört die Zeitdilatation bei GPS-Satelliten heute zum Alltag.

Weitere Aspekte

Zusätzlich zu dieser grundlegenden Teilung der Physik unterscheidet man manchmal noch weitere methodische Unterdisziplinen, vor allem die mathematische Physik und die angewandte Physik. Auch die Arbeit mit Computersimulationen hat innerhalb der letzten Jahre Züge eines eigenen Bereiches der Physik angenommen.

Mathematische Physik

Die mathematische Physik wird gelegentlich als Teilgebiet der theoretischen Physik betrachtet, unterscheidet sich von dieser jedoch darin, dass ihr Studienobjekt nicht konkrete physikalische Phänomene sind, sondern die Ergebnisse der theoretischen Physik selbst. Sie abstrahiert damit von jedweder Anwendung und interessiert sich stattdessen für die *mathematischen* Eigenschaften eines Modells, insbesondere seine tiefer liegenden Symmetrien. Auf diese Weise entwickelt sie Verallgemeinerungen und neue mathematische Formulierungen bereits bekannter Theorien, die dann wiederum als Arbeitsmaterial der theoretischen Physiker in der Modellierung empirischer Vorgänge Einsatz finden können.

Angewandte Physik

Die angewandte Physik steht dagegen in (unscharfer) Abgrenzung zur Experimentalphysik, teilweise auch zur theoretischen Physik. Ihr wesentliches Kennzeichen ist, dass sie ein gegebenes physikalisches Phänomen nicht um seiner selbst willen erforscht, sondern um die aus der Untersuchung hervorgegangenen Erkenntnisse zur Lösung eines (in der Regel) nicht-physikalischen Problems einzusetzen. Ihre Anwendungen liegen z. B. auf dem Gebiet der Technik oder Elektronik aber auch in den Wirtschaftswissenschaften, wo z. B. im Risikomanagement Methoden der theoretischen Festkörperphysik zum Einsatz kommen. Auch gibt es die interdisziplinären Bereiche der Medizinphysik, physikalischen Chemie, Astrophysik und Biophysik.

Simulation und Computerphysik

Mit der fortschreitenden Entwicklung der Rechensysteme hat sich in den letzten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts und beschleunigt seit etwa 1990 die Computersimulation als neue Methodik innerhalb der Physik entwickelt. Computersimulationen werden häufig als Bindeglied zwischen Theorie und Experiment verwendet, um Vorhersagen aus einer Theorie zu gewinnen, andererseits können Simulationen auch in Form einer effektiven Theorie, die ein experimentelles Ergebnis nachmodelliert, einen Impuls an die theoretische Physik zurückgeben. Naturgemäß hat dieser Bereich der Physik zahlreiche Anknüpfungspunkte an die Informatik.

Theoriengebäude der Physik

Das Theoriengebäude der Physik beruht in seinem Ursprung auf der klassischen Mechanik. Diese wurde im 19. Jahrhundert um weitere Theorien ergänzt, insbesondere den Elektromagnetismus und die Thermodynamik. Die moderne Physik beruht auf zwei Erweiterungen aus dem 20. Jahrhundert, der Relativitätstheorie und der Quantenphysik, die Grundprinzipien der klassischen Mechanik verallgemeinert haben. Beide Theorien enthalten die klassische Mechanik über das so genannte Korrespondenzprinzip als Grenzfall und haben daher einen größeren Gültigkeitsbereich als diese. Während die Relativitätstheorie teilweise auf denselben konzeptionellen Grundlagen basiert wie die klassische Mechanik, löst sich die Quantenphysik deutlich davon.

Klassische Mechanik

Die klassische Mechanik wurde im 16. und 17. Jahrhundert maßgeblich von Galileo Galilei und Isaac Newton begründet. Aufgrund der zu dieser Zeit noch recht begrenzten technischen Möglichkeiten, sind die Vorgänge, die die klassische Mechanik beschreibt, weitgehend ohne komplizierte Hilfsmittel beobachtbar, was sie anschaulich erscheinen lässt. Die klassische Mechanik behandelt Systeme mit wenigen massiven Körpern, was sie von der Elektrodynamik und der Thermodynamik unterscheidet. Raum und Zeit sind dabei nicht Teil der Dynamik sondern ein unbewegter Hintergrund, vor dem physikalische Prozesse ablaufen und Körper sich bewegen. Für sehr kleine Objekte tritt die Quantenphysik an die Stelle der klassischen Mechanik, während die Relativitätstheorie zur Beschreibung von Körpern mit sehr großen Massen und Energien geeignet ist.



Isaac Newton

Die mathematische Behandlung der klassischen Mechanik wurde im späten 18. und frühen 19. Jahrhundert in Form des Lagrange-Formalismus und des Hamilton-Formalismus entscheidend vereinheitlicht. Diese Formalismen sind auch mit der Relativitätstheorie anwendbar und sind daher ein bedeutender Teil der klassischen Mechanik. Obwohl die klassische Mechanik nur für mittelgroße, anschauliche Systeme gültig ist, ist die mathematische Behandlung komplexer Systeme bereits im Rahmen dieser Theorie mathematisch sehr anspruchsvoll. Die Chaostheorie befasst sich in großen Teilen mit solchen komplexen Systemen der klassischen Mechanik und ist derzeit (2009) ein aktives Forschungsgebiet.

Elektrodynamik

Mit der Entwicklung der Elektrizität und des Magnetismus im 18. und 19. Jahrhundert wurde eine Erweiterung des Theoriegebäudes der klassischen Mechanik notwendig. Die Gesetze der Elektrodynamik wurden im 19. Jahrhundert in Form der Maxwell-Gleichungen erstmals vollständig formuliert. Grundsätzlich wurden Elektrodynamische Systeme mit den Methoden der klassischen Mechanik behandelt, allerdings ermöglichen die Maxwell-Gleichungen auch eine Wellenlösung, die elektromagnetische Wellen wie das Licht beschreiben. Diese Theorie brachte unter anderem in Form der Wellenoptik auch einen eigenen Formalismus hervor, der sich grundlegend von dem der klassischen Mechanik unterscheidet. Besonders die Symmetrien der Elektrodynamik sind mit denen der klassischen Mechanik unvereinbar. Dieser Widerspruch zwischen den beiden Theoriegebäuden wurde durch die spezielle Relativitätstheorie gelöst. Die Wellenoptik ist in Form der nichtlinearen Optik noch heute (2009) ein aktives Forschungsgebiet.

Thermodynamik

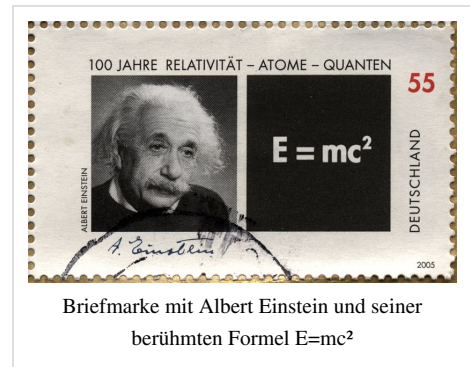
Etwa gleichzeitig mit der Elektrodynamik entwickelte sich mit der Thermodynamik ein weiterer Theorienkomplex, der sich grundlegend von der klassischen Mechanik unterscheidet. Im Gegensatz zur klassischen Mechanik stehen in der Thermodynamik nicht einzelne Körper im Vordergrund, sondern ein Ensemble aus vielen kleinsten Bausteinen, was zu einem radikal anderen Formalismus führt. Die Thermodynamik eignet sich damit zur Behandlung von Medien aller Aggregatzustände. Die Quantentheorie und die Relativitätstheorie lassen sich in den Formalismus der Thermodynamik einbetten, da sie nur die Dynamik der Bausteine des Ensembles betreffen, aber den Formalismus zur Beschreibung thermodynamischer Systeme nicht prinzipiell ändern.

Die Thermodynamik eignet sich beispielsweise zur Beschreibung von Wärmekraftmaschinen aber auch zur Erklärung vieler moderner Forschungsgegenstände wie Supraleitung oder Suprafluidität. Besonders im Bereich der

Festkörperphysik wird daher auch heute (2009) noch viel mit den Methoden der Thermodynamik gearbeitet.

Relativitätstheorie

Die von Albert Einstein begründete Relativitätstheorie führt ein völlig neues Verständnis der Phänomene Raum und Zeit ein. Danach handelt es sich bei diesen nicht um universell gültige Ordnungsstrukturen, sondern räumliche und zeitliche Abstände werden von verschiedenen Beobachtern unterschiedlich beurteilt. Raum und Zeit verschmelzen zu einer vierdimensionalen Raumzeit. Die Gravitation wird auf eine Krümmung dieser Raumzeit zurückgeführt, die durch die Anwesenheit von Masse bzw. Energie hervorgerufen wird. In der Relativitätstheorie wird erstmals die Kosmologie zu einem naturwissenschaftlichen Thema. Die Formulierung der Relativitätstheorie gilt als der Beginn der modernen Physik, auch wenn sie häufig als Vollendung der klassischen Physik bezeichnet wird.



Quantenphysik

Die Quantenphysik beschreibt die Naturgesetze im atomaren und subatomaren Bereich und bricht noch radikaler mit klassischen Vorstellungen als die Relativitätstheorie. In der Quantenphysik sind auch physikalische Größen selbst Teil des Formalismus und keine bloßen Kenngrößen mehr, die ein System beschreiben. Der Formalismus unterscheidet also zwischen zwei Typen von Objekten, den Observablen, die die Größen beschreiben und den Zuständen, die das System beschreiben. Ebenso wird der Messprozess aktiv in die Theorie miteinbezogen. Dies führt in bestimmten Situationen zur Quantisierung der Größenwerte, das heißt die Größen nehmen stets nur bestimmte diskrete Werte an. In der Quantenfeldtheorie, der am weitesten entwickelten relativistischen Quantentheorie, tritt auch Materie nur in Portionen, den sogenannten Elementarteilchen oder Quanten, in Erscheinung.

Die Gesetze der Quantenphysik entziehen sich weitgehend der menschlichen Anschauung, und über ihre Interpretation herrscht auch heute noch kein Konsens. Dennoch zählt sie hinsichtlich ihres empirischen Erfolges zu dem am besten gesicherten Wissen der Menschheit überhaupt.

Themenbereiche der modernen Physik

Die Theorien der Physik kommen in verschiedenen Themenbereichen zum Einsatz. Die Einteilung der Physik in Unterthemen ist nicht eindeutig und die Abgrenzung der Unterthemen gegeneinander ist dabei ähnlich schwierig wie die Abgrenzung der Physik zu anderen Wissenschaften. Es gibt dementsprechend viele Überschneidungen und gegenseitige Beziehungen der verschiedenen Bereiche zueinander. Hier wird eine Sammlung von Themengebieten nach betrachteter Größenordnung der Objekte dargestellt und im Zuge dessen auf Themengebiete verwiesen, die damit verwandt sind. Die aufgeführten Themen lassen sich nicht eindeutig einer Theorie zuordnen, sondern bedienen sich je nach dem untersuchten Gegenstand verschiedener theoretischer Konzepte.

Teilchenphysik

Die Teilchenphysik befasst sich mit Elementarteilchen und ihren Wechselwirkungen untereinander. Die moderne Physik kennt die folgenden vier Grundkräfte:

- Die Gravitation oder Schwerkraft,
- die elektromagnetische Wechselwirkung,
- die schwache Wechselwirkung, die beispielsweise für bestimmte radioaktive Zerfallsprozesse verantwortlich ist und
- die starke Wechselwirkung, die die Atomkerne zusammenhält.

Diese Wechselwirkungen werden durch den Austausch sogenannter Eichbosonen beschrieben. Die Teilchenphysik klammert dabei die Gravitation derzeit (2009) aus, da es noch keine Theorie der Quantengravitation gibt, die die gravitativen Wechselwirkungen von Elementarteilchen vollständig beschreiben kann. In der Teilchenphysik werden relativistische Quantentheorien zur Beschreibung der Phänomene verwendet.

Eines der Ziele der Teilchenphysik ist es, alle Grundkräfte in einem vereinheitlichten Gesamtkonzept zu beschreiben (Weltformel). Bisher ist es jedoch lediglich gelungen, die elektromagnetische Wechselwirkung als Vereinigung der elektrischen und der magnetischen Wechselwirkung darzustellen und ebenso die elektromagnetische Wechselwirkung und die schwache Wechselwirkung zu einer sogenannten elektroschwachen Wechselwirkung zu vereinigen. Zur Vereinigung der elektroschwachen und der starken Wechselwirkung wurde unter anderem die Theorie der Supersymmetrie erdacht, die bislang jedoch nicht experimentell bestätigt werden konnte. Die größten Schwierigkeiten treten wie bereits erwähnt im Bereich der Gravitationskraft auf, da noch keine Theorie der Quantengravitation vorliegt, aber Elementarteilchen nur im Rahmen der Quantentheorie beschrieben werden können.

Hadronen- und Atomkernphysik

→ *Hauptartikel: Hadronenphysik und Kernphysik*

Die Elementarteilchen, die der starken Wechselwirkung unterliegen, die sogenannten Quarks, kommen nicht einzeln, sondern immer nur in gebundene Zuständen, den Hadronen, vor, zu denen unter anderem das Proton und das Neutron gehören. Die Hadronenphysik hat viele Überschneidungen mit der Elementarteilchenphysik, da viele Phänomene nur erklärt werden können, indem berücksichtigt wird, dass die Hadronen aus Quarks aufgebaut sind. Die Beschreibung der starken Wechselwirkung durch die Quantenchromodynamik, eine relativistische Quantenfeldtheorie, kann jedoch die Eigenschaften der Hadronen nicht vorhersagen, weshalb die Untersuchung dieser Eigenschaften als eigenständiges Forschungsgebiet aufgefasst wird. Es wird also eine Erweiterung der Theorie der starken Wechselwirkung für kleine Energien angestrebt, bei denen sich die Hadronen bilden.

Atomkerne stellen gegenüber Elementarteilchen die nächste Komplexitätsstufe dar. Sie bestehen aus mehreren Nukleonen, also Protonen und Neutronen, deren Wechselwirkungen untersucht werden. In Atomkernen herrscht die starke und die elektromagnetische Wechselwirkung vor. Forschungsgebiete der Atomkernphysik umfassen radioaktive Zerfälle und Stabilität von Atomkernen. Ziel ist dabei die Entwicklung von Kernmodellen, die diese Phänomene erklären können. Dabei wird aber auf eine detaillierte Ausarbeitung der starken Wechselwirkung wie in der Hadronenphysik verzichtet.

Atom- und Molekülphysik

Atome bestehen aus dem Atomkern und meist mehreren Elektronen und stellen die nächste Komplexitätsstufe der Materie dar. Ziel der Atomphysik ist es unter anderem, die Linienspektren der Atome zu erklären, wozu eine genaue quantenmechanische Beschreibung der Wechselwirkungen der Elektronen der Atome notwendig ist. Da Moleküle aus mehreren Atomen aufgebaut sind, arbeitet die Molekülphysik mit ähnlichen Methoden, allerdings stellen insbesondere große Moleküle meist deutlich komplexere Systeme dar, was die Rechnungen sehr viel komplizierter und häufig den Einsatz von Computersimulationen erforderlich macht.

Die Atom- und Molekülphysik stehen über die Untersuchung der optischen Spektren von Atomen und Molekülen mit der Optik in enger Beziehung. So baut beispielsweise das Funktionsprinzip des Lasers, einer bedeutenden technischen Entwicklung, maßgeblich auf den Ergebnissen der Atomphysik auf. Da die Molekülphysik sich auch intensiv mit der Theorie der chemischen Bindungen befasst, sind in diesem Themengebiet Überschneidungen mit der Chemie vorhanden.

Kondensierte Materie und Fluidodynamik

Die Physik der kondensierten Materie und die Fluidodynamik sind in dieser Auflistung das Gebiet mit der größten thematischen Bandbreite, von der Festkörperphysik bis zur Plasmaphysik. All diesen Bereichen ist gemeinsam, dass sie sich mit makroskopischen Systemen aus sehr vielen Atomen, Molekülen oder Ionen befassen. Dementsprechend ist in allen Bereichen dieses Themengebiets die Thermodynamik ein wichtiger Teil des theoretischen Fundamentes. Je nach Problem kommen aber auch Quantentheorie und Relativitätstheorie zum Einsatz, um die Systeme zu beschreiben. Auch Computersimulationen sind ein fester Bestand der Forschung an solchen Vielteilchensystemen.

Aufgrund der thematischen Bandbreite existieren Überschneidungen mit nahezu allen anderen Gebieten der Physik, zum Beispiel mit der Optik in Form laseraktiver Medien oder nichtlinearer Optik, aber auch mit der Akustik, Atom-, Kern- und Teilchenphysik. Auch in der Astrophysik spielt die Fluidodynamik eine große Rolle bei der Erstellung von Modellen zur Entstehung und zum Aufbau von Sternen, sowie bei der Modellierung vieler anderer Effekte. Viele Forschungsbereiche sind dabei sehr anwendungsorientiert, wie die Materialforschung, die Plasmaphysik oder die Erforschung der Hochtemperatursupraleiter.

Astrophysik und Kosmologie

Astrophysik und Kosmologie sind interdisziplinäre Forschungsgebiete, die sich stark mit der Astronomie überschneiden. Nahezu alle anderen Themenbereiche der Physik gehen in die astrophysikalischen Modelle ein, um Prozesse auf verschiedenen Größenskalen zu modellieren. Ziel dieser Modelle ist es, astronomische Beobachtungen auf der Grundlage der bisher bekannten Physik zu erklären. Da in der Astrophysik nur in sehr beschränktem Ausmaß Experimente möglich sind, ist dieses Teilgebiet der Physik sehr stark auf die Beobachtung unbeeinflussbarer Phänomene angewiesen.

Die Kosmologie baut insbesondere auf den Grundlagen der allgemeinen Relativitätstheorie auf, allerdings sind im Rahmen der Quantenkosmologie auch die Quantentheorien sehr bedeutsam um die Entwicklung des Universums in sehr viel früheren Phasen zu erklären. Das derzeit (2009) am meisten Vertretene kosmologische Standardmodell baut dabei maßgeblich auf den Theorien der Dunklen Materie und der Dunklen Energie auf. Weder dunkle Materie noch dunkle Energie konnte bisher direkt experimentell nachgewiesen werden, es existieren aber eine Vielzahl von Theorien, was genau diese Objekte sind.

Interdisziplinäre Themenbereiche

Methoden der Physik finden in vielen Themengebieten Anwendung, die nicht zum Kernthemenbereich der Physik gehören. Einige dieser Anwendungen sind in den vorigen Kapiteln bereits angesprochen worden. Die folgende Aufzählung gibt einen kurzen Überblick über die wichtigsten interdisziplinären Themenbereiche.

- Die Astrophysik wendet physikalische Methoden auf das Studium astronomischer Phänomene an.
 - In der Biophysik werden die physikalischen Gesetzmäßigkeiten untersucht, denen Lebewesen und ihre Wechselwirkung mit der Natur unterliegen.
 - Bei der physikalischen Chemie werden Methoden der Physik auf die Anschauungsobjekte der Chemie angewendet.
 - Die Geophysik nutzt physikalische Modelle und Methoden zur Erklärung geowissenschaftlicher Vorgänge und Fragestellungen.
-

- Die Technische Physik befasst sich mit den technischen Anwendungen physikalischen Wissens. Wichtige Teilbereiche sind die Quantenelektronik und die Theorie der Quantencomputer.
- Die Umweltphysik beschäftigt sich in ihrer Forschung vor allem mit den Bereichen Energie und Klima.
- Soziophysik und Ökonophysik wenden physikalische und statistische Methoden auf gesellschaftliche, wirtschaftliche, kulturelle und politische Phänomene an.

Grenzen der physikalischen Erkenntnis

→ *Siehe auch: Wissenschaftstheorie*

Der derzeitige Stand der Physik ist nach wie vor mit noch ungelösten Problemen konfrontiert. Zum einen handelt es sich dabei um den weniger grundsätzlichen Fall von Problemen, deren Lösung prinzipiell möglich, aber mit den derzeitigen mathematischen Möglichkeiten bestenfalls annäherbar ist. Zum anderen gibt es eine Reihe von Problemen, für die noch unklar ist, ob eine Lösung im Begriffsrahmen der heutigen Theorien überhaupt möglich sein wird. So ist es bislang nicht gelungen, eine vereinheitlichte Theorie zu formulieren, welche sowohl Phänomene beschreibt, die der elektroschwachen wie der starken Wechselwirkung unterliegen, wie auch solche, welche der Gravitation unterliegen. Erst bei einer solchen Vereinigung von Quantentheorie und Gravitationstheorie (allgemeiner Relativitätstheorie) könnten alle vier Grundkräfte einheitlich behandelt werden, so dass eine vereinheitlichte Theorie der Elementarteilchen resultierte.

Die bisherigen Kandidaten von Quantengravitationstheorien, Supersymmetrie und Supergravitations-, String- und M-Theorien versuchen eine solche Vereinheitlichung zu erreichen. Überhaupt ist es ein praktisch leitendes Ziel heutiger Physiker, sämtliche Vorgänge der Natur durch eine möglichst geringe Anzahl von möglichst einfachen Naturgesetzen zu beschreiben. Diese sollen das Verhalten möglichst grundlegender Eigenschaften und Objekte (etwa Elementarteilchen) beschreiben, so dass höherstufige (emergente) Prozesse und Objekte auf diese Beschreibungsebene reduzierbar sind.

Ob dieses Ziel prinzipiell oder praktisch erreichbar ist, ist eigentlich nicht mehr Gegenstand der einzelwissenschaftlichen physikalischen Erkenntnisbemühung, ebenso wenig, wie es allgemeine Fragen darüber sind, welchen Gewissheitsgrad physikalische Erkenntnisse grundsätzlich erreichen können oder faktisch erreicht haben. Derartige Fragen sind Gegenstand der Epistemologie und Wissenschaftstheorie. Dabei werden ganz unterschiedliche Positionen verteidigt. Relativ unbestritten ist, dass naturwissenschaftliche Theoriebildungen in dem Sinne nur Hypothesen sind, dass man nicht mit Gewissheit wissen kann, ob es sich dabei um wahre und gerechtfertigte Auffassungen handelt. Man kann hier noch in spezifischerer Weise vorsichtig sein, indem man sich auf die Theorie- und Begriffsvermitteltheit aller empirischen Erkenntnisse beruft oder auf die Tatsache, dass der Mensch als erkennendes Subjekt ja unter den Gegenstandsbereich physikalischer Theorien fällt, aber nur als wirklich Außenstehender sicheres Wissen haben könnte. Denn für Beobachter, die mit ihrem Erkenntnisobjekt interagieren, bestehen prinzipielle Grenzen der Prognostizierbarkeit im Sinne einer Ununterscheidbarkeit des vorliegenden Zustandes – eine Grenze, die auch dann gelten würde,^[3] wenn der Mensch alle Naturgesetze kennen würde und die Welt deterministisch wäre (zumindest ersteres ist sicher falsch). Diese Grenze hat praktische Bedeutung bei deterministischen Prozessen, für welche geringe Änderungen des Anfangszustands zu großen Abweichungen in Folgezuständen führen – Prozesse, wie sie durch die Chaostheorie beschrieben werden. Aber nicht nur eine praktische Voraussagbarkeit ist in vielen Fällen nur begrenzt möglich, auch wird von einigen Wissenschaftstheoretikern eine Aussagefähigkeit physikalischer Modelle über die Realität überhaupt bestritten. Dies gilt in verschiedenen Ausarbeitungen eines sogenannten wissenschaftstheoretischen Antirealismus in unterschiedlichem Ausmaß: für unterschiedliche Typen physikalischer Begriffe wird eine reale Referenz bestritten oder für unwissbar gehalten.^[4] Auch eine prinzipielle oder wahrscheinliche Zusammenführbarkeit einzelner Theorien wird von einigen Wissenschaftstheoretikern bestritten.^[5]

Beziehung zu anderen Wissenschaften

Die Physik gilt als die grundlegende Naturwissenschaft, auf der alle anderen wie beispielsweise die Astronomie, die Chemie, die Geologie und die Biologie aufbauen. Physikalische Prinzipien und Modelle finden ihre Anwendung auch in anwendungsorientierten Disziplinen, besonders im technischen Bereich, wie in den Ingenieurwissenschaften, aber auch in den quantitativen Wirtschaftswissenschaften. Umgekehrt haben auch oft Erkenntnisse aus anderen Fachgebieten wie der Mathematik oder der Astronomie die physikalische Forschung bereichert und stimuliert.

Die Beziehungen zur Philosophie sind traditionell eng, hat sich doch die Physik aus der klassischen Philosophie entwickelt, ohne sich dabei jemals grundsätzlich in Gegensatz zu ihr zu stellen und waren nach heutigen Kategorien zahlreiche bedeutende Physiker zugleich wichtige Philosophen und umgekehrt. Gemäß der heutigen philosophischen Disziplinenunterscheidung ist die Physik insbesondere auf die Ontologie bezogen, welche die Grundstrukturen der Realität in möglichst allgemeinen Begriffen zu beschreiben versucht, darüber hinaus auf die Erkenntnistheorie, welche die Gütekriterien von Wissen überhaupt zu erfassen versucht, spezifischer noch auf die Wissenschaftstheorie, welche die allgemeinen Methoden wissenschaftlicher Erkenntnis zu bestimmen versucht und natürlich auf die Naturphilosophie bzw. Philosophie der Physik, die oftmals als Unterdisziplin der Ontologie oder Wissenschaftstheorie behandelt wird, jedenfalls aber spezifischer gerade auf die Einzelerkenntnisse der Physik bezogen arbeitet, deren Begriffssystem analysiert und ontologische Interpretationen physikalischer Theorien diskutiert.

Physik in der Gesellschaft

Da die Physik als die grundlegende Naturwissenschaft gilt, wird physikalisches Wissen und Denken bereits in der Schule meist im Rahmen eines eigenen Schulfaches unterrichtet. Im Rahmen des Schulsystems wird Physik in der Regel als Nebenfach ab Klassenstufe 5-7 unterrichtet, und wird in der Oberstufe oft auch als Leistungskurs geführt. *Siehe auch: Physikunterricht*

Die meisten Universitäten bieten das Studienfach Physik an, *siehe hierzu auch: Physikstudium*.

Seit 1901 vergibt die Schwedische Akademie der Wissenschaften jährlich den Nobelpreis für Physik.



Historisch wurde im Zusammenhang mit der Physik erstmals die Frage nach der Ethik naturwissenschaftlicher Forschung aufgeworfen. Dieses Thema wird auch in der Literatur, etwa in Friedrich Dürrenmatts Theaterstück *Die Physiker* aufgegriffen.

2005 war das Jahr der Physik.

Einzelnachweise

- [1] Wilhelm Gemoll: *Griechisch-Deutsches Schul- und Handwörterbuch*. München/Wien 1965.
- [2] Erich Pertsch: *Langenscheidts Großes Schulwörterbuch Lateinisch-Deutsch*. Langenscheidt, Berlin 1978, ISBN 3-468-07201-5
- [3] Vgl. Esfeld, *Naturphilosophie*, 128
- [4] Vgl. Eintrag (<http://plato.stanford.edu/entries/scientific-realism/>) in der *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (englisch, inklusive Literaturangaben)
- [5] Vgl. „Scientific Progress“ (<http://plato.stanford.edu/entries/scientific-progress/>) in der *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (englisch, inklusive Literaturangaben) und „The Unity of Science“ (<http://plato.stanford.edu/entries/scientific-unity/>) in der *Stanford Encyclopedia of Philosophy* (englisch, inklusive Literaturangaben); Esfeld, *Naturphilosophie*, 100-115.

Literatur

Wissenschaftsgeschichte

→ siehe Geschichte der Physik

Philosophie der Physik – historisch

- James T. Cushing: *Philosophical concepts in physics*, the historical relation between philosophy and scientific theories, Cambridge : Cambridge Univ. Press 1998, ISBN 0-521-57823-X Analyse konzeptueller Grundlagen von Aristoteles bis John Stewart Bell
- Roberto Torretti: *The Philosophy of Physics*, Cambridge: CUP 1999. Grundbegriffe von Galilei bis Dirac

Philosophie der Physik – systematisch

- Andreas Bartels: *Grundprobleme der modernen Naturphilosophie.*, UTB, 1996, ISBN 3-8252-1951-8
- Stefan Bauberger: *Was ist die Welt*, Stuttgart: Kohlhammer 2003. (Begleitmaterial (http://bauberger.net/vorlesungen___seminare.html))
- Thomas Brody: *The Philosophy Behind Physics*, Springer 1993
- Jeremy Butterfield, John Earman, Dov M. Gabbay, Paul Thagard, John Woods (Hgg): *Handbook of the Philosophy of Physics*, Elsevier 2007, ISBN 0-444-51560-7 Standardwerk
- Michael Drieschner: *Moderne Naturphilosophie. Eine Einführung*. Mentis, Paderborn 2002, ISBN 3-89785-260-8
- Michael Esfeld: *Einführung in die Naturphilosophie*. Darmstadt: WBG, 2002, ISBN 3-534-15461-4
- M. Lange: *An Introduction to the Philosophy of Physics*, London: Blackwell 2002 Besonders zu den Themen Lokalität, Felder, Energie, Masse; etwas spezieller, da nicht nur überblicksweise Darstellung, sondern auch Argumentation für eigene Position.
- L. Sklar: *Philosophy of Physics*, Oxford: OUP 1992. Kurzer Abriss von Grundlagen zu Raumzeit, Wahrscheinlichkeit, Quanten

siehe auch: Philosophie der Physik, Allgemeine Wissenschaftstheorie, Naturphilosophie

Lehrbücher

- Ludwig Bergmann, Clemens Schaefer, Thomas Dorfmueller, Wilhelm T. Hering, Klaus Stierstadt: *Lehrbuch der Experimentalphysik*. 11. Auflage. de Gruyter, 1998, ISBN 3-11-012870-5
- W. Demtröder: *Experimentalphysik*. 4. Auflage. Springer, 2005, ISBN 3-540-26034-X
- Lew Dawidowitsch Landau, Jewgeni Michailowitsch Lifschitz: *Lehrbuch der theoretischen Physik* in 10 Bänden, Akademie-Verlag Berlin, neu: Harri Deutsch-Verlag Frankfurt/Main
- Richard Feynman, Robert Leighton, Matthew Sands: *Vorlesungen über Physik*. Oldenbourg 1999, ISBN 3-486-25857-5
- Ch. Gerthsen, D. Meschede: *Gerthsen Physik*. 23. Auflage. Springer-Verlag, 2006, ISBN 3-540-25421-8
- Richard Mestwerdt, Werner Schulte: *Grundstock des Wissens Physik*. ECO, 2000, ISBN 3-934519-50-4
- Paul A. Tipler, Gene Mosca: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. 2. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, 2004, ISBN 3-8274-1164-5

Weblinks

- Physik allgemein
 - Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. (<http://www.dpg-physik.de/>)
 - Physikalisch-Technische Bundesanstalt (<http://www.ptb.de/>)
 - Didaktische Hinweise im Wiki der Zentrale für Unterrichtsmedien e.V.
 - Motion Mountain – Freies Lehrbuch der Physik (<http://www.motionmountain.net/>)
- Physik-Portale
 - Welt der Physik (<http://www.weltderphysik.de/>)
 - pro-physik.de – Portal für Fachleute mit News und Produktinformationen (<http://www.pro-physik.de/>)

- Physikportal für Studierende (<http://lp.uni-goettingen.de/get/text/1>), E-Learning-Inhalte zum Kanon des Physikstudiums, Georg-August-Universität Göttingen
- Physikportal für Schüler (<http://www.leifiphysik.de/>)
- Physik einfach erklärt (<http://www.iap.uni-bonn.de/P2K/cover.html>)
- Zusammenstellung internationaler Physik-Konferenzen (<http://www.physik-konferenzen.de/>)

Pigment

Pigmente (lateinisch *pigmentum* für „Farbe“, „Schminke“) sind farbbgebende Substanzen, die technisch verwendet werden. Im Gegensatz zu Farbstoffen sind Pigmente jedoch im Anwendungsmedium unlöslich. Anwendungsmedium bezeichnet dabei den Stoff, in den das Pigment eingearbeitet wird, beispielsweise einen Lack oder einen Kunststoff. Farbstoffe und Pigmente gehören gemeinsam zu den Farbmitteln und können anorganisch oder organisch, bunt oder unbunt sein.^[1] In der Biologie bezeichnet der Begriff Pigment alle in einem lebenden Organismus farbbgebenden Substanzen. Technisch gesehen handelt es sich hierbei um Farbmittel.

Maßgeblich für die Eigenschaften der Pigmente sind neben der *chemischen Struktur* an sich auch *Festkörpereigenschaften*, wie die Kristallstruktur, die Kristallmodifikation, die Teilchengröße und die Teilchengrößenverteilung, also die spezifische Oberfläche. Der Farbreiz selbst entsteht durch Absorption und Remission (Streuung und/oder Reflexion) bestimmter Frequenzanteile des sichtbaren Lichts.

Pigmente werden beispielsweise in Lacken, Dispersionsfarben, Druckfarben (im Drei- oder Vierfarbendruck auf Papier), als Streichpigment (Weißpigmente) und Füllstoff bei der Herstellung und Veredelung von Papier, bei der Einfärbung von Kunststoffen, in Künstlerfarben und Buntstiften, beim Drucken auf Textilien und in Spezialanwendungen wie Kosmetika oder Kerzen verwendet.

Geschichte

Belege für die Verwendung von Erdfarben reichen bis weit in die Prähistorie zurück. In der Fels- und Höhlenmalerei sind Erdfarben nachgewiesen. Es ist davon auszugehen, dass sie seit der Frühzeit der Menschheit der Körperbemalung dienten. Ockergelbe, weiße und rostrote bis braune Farbtonabstufungen sind als natürliche Vorkommen häufiger anzutreffen. Seltener kommen grünliche Erden vor, ebenso rar sind als Pigment geeignete schwarze Mineralien. Dennoch konnte der prähistorischen Maler seine Farbpalette leicht mit schwarzer Holz- oder Knochenkohle oder ziegelrot gebrannten Ocker erweitern.



Das Mineral Türkis



Das Mineralpigment Ultramarin



Mennige

Solche aus dem Lagerfeuer hervorgehenden Produkte können bereits den künstlichen Pigmenten zugeordnet werden, obwohl Ocker und Holzkohle durch natürliche Feuer ebenso entstehen können. Unter solchen Umständen hat die in maltechnischer Tradition stehende schematische Gruppierung in natürliche und künstliche Pigmente unter geschichtlichen Aspekten wenig Sinn. Die Geschichte der Herstellung und Verwendung von Pigmenten ist deshalb im Einzelnen zu betrachten. Erschwerend ist dabei die Bestimmung der Pigmente anhand überlieferter Namen.

Unlösliche Pigmente wurden schon in der Frühzeit der Menschheit für verschiedene Anlässe und Einsatzgebiete, wie z.B. Körperbemalung, Höhlenmalerei und Keramikdekor, verwendet. Wichtige anorganische Farbmittel der Frühzeit waren ein mit Hämatit (ein rotes Eisenoxid) gefärbter Ton (Rötel), Ocker (ein gelbes Eisenoxid) und Braunstein. Eine der seit Urzeiten verwendeten Farben ist Weiß und eines der ältesten Weißpigmente ist das Calciumoxid (CaO), welches durch Brennen aus Kalkstein gewonnen wird, siehe Kalkfarbe.

In der Malerei war lange Zeit das Bleiweiß ($\text{Pb}(\text{OH})_2 \cdot 2 \text{PbCO}_3$) das einzig verfügbare weiße Pigment, bis dieses schließlich Anfang des 19. Jahrhunderts durch das Zinkweiß (ZnO) ersetzt wurde, welches wegen seiner geringeren Toxizität dem Bleiweiß vorgezogen wurde. Heute wird fast ausschließlich das erst im 20. Jahrhundert entwickelte Titanweiß (TiO_2) verwendet. Weiße lösliche Farbstoffe sind jedoch physikalisch unmöglich.

Eine der teuersten Farben war bis zum 18. Jahrhundert das Blau, für das es zum damaligen Zeitpunkt neben den synthetisch hergestellten Smaltepigmenten nur den Halbedelstein Lapislazuli als Rohstoff gab, der nach einem arbeitsintensiven Prozess dann das Ultramarin ergibt.

Das erste industriell hergestellte anorganische Pigment war Berliner Blau im Jahr 1704. Das erste organische Pigment, Pararot, heute C.I. Pigment Red 1, ein Azopigment der β -Naphthol-Gruppe folgte im Jahr 1885.^[2] Kupferphthalocyanin folgte 1935 und Chinacridon 1955. Die im Jahre 1986 entdeckte chemische Gruppe Diketo-Pyrrolo-Pyrrol war der letzte Pigmenttyp, der nennenswerte Marktanteile gewinnen konnte.

Heute werden Pigmente in vielen Branchen eingesetzt: Farben, Lacke, Druckfarben und Kunststoffe, aber auch Kosmetik, Papier, Baumaterialien, Keramik und Glas. In der Textilindustrie werden lösliche Farbstoffe zunehmend durch Pigmente, dort als Dispersionsfarbstoffe bezeichnet, ersetzt. Im Jahr 2006 erreichte der weltweite Markt für anorganische, organische und Spezialpigmente ein Volumen von rund 7,4 Millionen Tonnen. Den mengenmäßig größten Anteil hat Asien vor Europa und Nordamerika. Dabei wurde ein Umsatz von rund 17,6 Milliarden US-Dollar (etwa 13 Milliarden Euro) erzielt.^[3] Im Jahr 2009 wurden weltweit Pigmente für rund 20,5 Milliarden US-Dollar verkauft, ca. 1,5 - 2% Wachstum vom letzten Jahr. Der Umsatz wird rund 24,5 Milliarden US Dollar in 2010 und rund 27,5 Milliarden in 2018 erreichen.^[4]

Verarbeitung

→ Hauptartikel: *Dispergierung (Lack)*

Pigmente entstehen typischerweise in Form der *Primärteilchen*. Die Primärteilchen können über ihre Flächen zu Aggregaten zusammenwachsen. Von *Agglomeraten* spricht man, wenn Primärteilchen und/oder Aggregate über ihre Ecken/Kanten verbunden sind. Durch den Dispergierprozess (*Dispergierung*) beim Einarbeiten der Pigmente in ein Anwendungsmedium werden die Pigment-Agglomerate zerkleinert. Es entstehen kleinere Agglomerate, Aggregate und Primärteilchen. Diese werden, so vorhanden, durch ein Dispergiermedium benetzt. Dabei werden sie idealerweise statistisch über das Anwendungsmedium verteilt.

In fester Form kann das Pigment pur eingesetzt werden (*Primärpigment*), als festes Gemisch zweier oder mehrerer Pigmente oder als Gemisch mit einem oder mehreren Füllstoffen. Durch die Mischung mit Füllstoffen wird die Farbstärke reduziert, wodurch geringe Einsatzmengen besser dosiert werden können. Diese Möglichkeit findet bei Pulverlacken Verwendung. Durch räumliche Nähe wirken primäre Pigmente intensiver (Simultankontrast).

Bei flüssigen Lacken werden häufig Pigmentpräparationen eingesetzt, die entweder Bindemittel enthalten können oder bindemittelfrei sind. Diese Pigmentpräparationen sind prinzipiell ähnlich formuliert wie der Lack selbst, enthalten also Pigment, Additive, Lösemittel oder Wasser und je nach Formulierung Bindemittel. Der Vorteil von

Pigmentpräparationen ist die unkomplizierte und exakte Einarbeitung, da das Pigment bereits dispergiert und standardisiert vorliegt und somit Lack und Pigmentpräparation nur noch gemischt werden müssen. Nachteilig kann sich die Additivierung auswirken, da die Pigmentpräparation unter Umständen nicht mehr mit allen Lacksystemen kompatibel ist. Aus diesem Grund ist die Verträglichkeit eine wichtige anwendungstechnische Eigenschaft von Pigmentpräparationen. Als Tönsystem (englisch *Tinting system*) wird die Kombination aus mehreren (meist 12 - 20) Pigmentpräparationen, einer automatischen Dosieranlage und einer Rezeptiersoftware bezeichnet. Diese Methode findet bei Bautenfarben Verwendung. Pigmentpräparationen können ebenfalls als Mischung mit anderen Pigmenten oder Füllstoffen vorliegen. Neben den häufig eingesetzten flüssigen Pigmentpräparationen sind aber auch granulierten, mit leicht löslichen Bindemitteln hergestellte Präparationen erhältlich. Sie werden z. B. eingesetzt, wenn in der Lackformulierung zusätzliche Lösemittel unerwünscht sind, haben aber gegenüber Pigmentpulvern den Vorteil, nicht mehr dispergiert werden zu müssen und weitgehend staubfrei zu sein.

Eine dritte, vor allem in der Kunststoffindustrie weit verbreitete, Möglichkeit besteht in der Verwendung von festen Pigmentpräparationen, sogenannten Masterbatches. Dabei werden die Pigmente bei erhöhter Verarbeitungstemperatur in eine Bindemittelmatrix extrudiert oder geknetet. Nach dem Abkühlen werden die wieder festen Masterbatches meist granuliert, so dass sie bei der Einarbeitung in den Kunststoff exaktere und reproduzierbarere Farbtöne erzeugen. Auch Masterbatches können je nach gewünschtem Effekt mehrere Pigmente oder Füllstoffe enthalten.

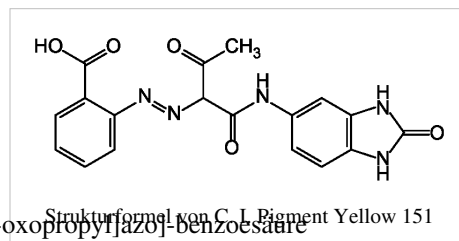
Nomenklatur

Pigmente werden üblicherweise mit *Trivialnamen*, *Handelsnamen* oder Bezeichnungen aus dem *Colour Index (C.I. Generic Name)* benannt, da systematische Nomenklaturen gemäß IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) oder nach CAS (*Chemical Abstracts Service*) zu unhandlichen Namen führen.

Ein Beispiel

- Trivialname: Brillantgelb
- Handelsnamen: Aureolin, Benzimidazol-Gelb
- Geschützter Handelsname: Hostaperm (TM) Yellow H4G
- C. I. Generic Name: C. I. Pigment Yellow 151
- IUPAC Name:

2-[[1-[(2,3-Dihydro-2-oxo-1*H*-benzimidazol-5-yl)amino]carbonyl]-2-oxopropyl]azo]-benzoesäure



- CAS index name: Benzoic acid,
2-[[1-[(2,3-dihydro-2-oxo-1*H*-benzimidazol-5-yl)amino]carbonyl]-2-oxopropyl]azo]-

Einteilung nach Eigenschaften

Pigmente mit gemeinsamen Eigenschaften werden zu Gruppen zusammengefasst, die je nach Einsatzzweck zu unterschiedlichen Gliederungen führt. Die DIN 55943 unterteilt Farbmittel zunächst in organische und anorganische Farbmittel. Jede der beiden Gruppen wird in Farbstoffe und Pigmente eingeteilt. In der nächsten Ebene folgt die Einteilung nach der optischen Wirkung. Es wird unterschieden zwischen Weißpigmenten, Buntpigmenten und -farbstoffen, Schwarzpigmenten und -farbstoffen, Effektpigmenten sowie Leuchtpigmenten und -farbstoffen. Die Gruppen Weißfarbstoffe und Effektfarbstoffe sind physikalisch nicht möglich, da die Wirkung als Pigment ausschließlich auf Streuung (Weißpigmente) beziehungsweise Reflexion (Effektpigmente) beruht. Dies setzt eine Grenzfläche voraus, die die gelösten Farbstoffe nicht besitzen.^[5]

Die anorganischen Farbmittel werden nicht weiter unterteilt, da es sich um eine Norm aus dem Lackbereich handelt und dort keine anorganischen Farbmittel verwendet werden.^[5]

Eine nach Farbton geordnete Aufzählung einzelner Pigmente ist unter Liste der Pigmente angegeben.

Anorganische Pigmente

Einteilung in natürliche und synthetisch hergestellte Pigmente

Bei den anorganischen Pigmenten wird zwischen natürlichen und synthetisch hergestellten Pigmenten unterschieden. Zur ersten Gruppe gehören Erden und Mineralien (Erdfarben, Mineralweiß), die zu ihrer Anwendung keiner oder nur einer mechanischen Aufbereitung (zumeist Trocknen und Mahlen) bedürfen. Zur zweiten Gruppe gehören anorganische Pigmente wie etwa Metalleffektpigmente, Ruß, Weißpigmente oder Eisenoxidpigmente, also Syntheseprodukte aus unterschiedlichen Herstellungsverfahren.

Industriell werden aufgrund der stabileren Qualität und der höheren Reinheit fast nur noch synthetisch hergestellte anorganische Pigmente hergestellt.^[6]

Nicht in jedem Fall lässt sich am Material feststellen, ob es natürlicher oder künstlicher Herkunft ist. Das gilt beispielsweise für bestimmte eisenoxidhaltige Farbschichten der prähistorischen Malerei. Das darin nachweisbare rote Pigment könnte aus natürlichem Vorkommen stammen oder gezielt aus gelbem Ocker am Lagerfeuer erzeugt worden sein. Auch die Angabe Zinnober, die rote Modifikation des Quecksilbersulfids, sagt nichts über einen natürlichen Ursprung aus. Zudem war „zinnober“ im Altertum ein Synonym für rot und gleichbedeutend mit Minium, das Mennige ist, Blei(II)/(IV)-Oxid. Die in den 1940er Jahren aufkommende Untergliederung der anorganischen Pigmente in natürliche und künstliche lässt sich somit nicht auf die chemische Struktur zurückführen.

Einteilung nach chemischen Klassen

Chemisch können die industriell wichtigsten Pigmente in acht Stoffklassen eingeteilt werden. Im einzelnen sind dies Titandioxid, Ruß, Bismutpigmente, Oxide und Hydroxide, Eisencyanblau, Ultramarin, Cadmiumpigmente und Chromatpigmente.^[6]

Die Gruppe der Oxide und Hydroxide wird weiter unterteilt in Eisenoxidpigmente, Chromoxid, und Mischphasenoxidpigmente (letztere mit den Untergruppen Spinellpigmente, Hämatitpigmente, Inverse Spinellpigmente und Rutilderivate). Die Gruppe der Chromatpigment unterteilt sich weiter in Chromgelb, Chromgrün und Molybdate.^[6]

Ruß nimmt hierbei eine Sonderstellung ein. Ruß ist per Definition anorganisch. Es wird aufgrund der geringen Partikelgröße und der daraus resultierenden anwendungstechnischen Eigenschaften oft als organisches Pigment eingeordnet.^[6]



Zinnober, mineralisch - ein Rohstoff für das zinnoberfarbene Rotpigment Quecksilbersulfid



Eisenoxidrot, gelbstichige Variante



Bismutvanadat

Eigenschaften

Die meisten anorganischen Pigmente zeichnen sich dadurch aus, dass sie mit dem Sauerstoff der Luft nicht chemisch reagieren, daher äußerst resistent gegen Alterung sind und ihren Farbton praktisch beliebig lange beibehalten, wobei diese jedoch durch die Alterung eines organischen Malmittels, wie etwa Öl, mit der Zeit beeinträchtigt werden kann.

Ihre hohe Hitzebeständigkeit macht den Einsatz in der Porzellanmalerei möglich. Hier können nur anorganische Pigmente eingesetzt werden, da organische Pigmente nicht temperaturstabil sind und beim Brennen zerstört werden. In der industriellen Anwendung ist eine hohe Hitzebeständigkeit für Kunststoffeinfärbung, Pulverlacke oder Coil Coating wichtig, wobei wegen tieferer Temperaturen hitzebeständige organische Pigmente eingesetzt werden können.

Frühere, heutzutage zumindest in Europa nur noch selten verwendete Pigmente wie Cadmiumsulfid, Bleichromat oder Molybdatrot sind gesundheitlich bedenklich, da es sich um Schwermetallverbindungen handelt.

Der Farbton anorganischer Buntpigmente wird häufig als trüb im Vergleich zu organischen Pigmenten beschrieben. Für Pigmente wie die Eisenoxidpigmente oder Chromoxidgrün trifft dies uneingeschränkt zu, dennoch existieren auch einige anorganische Pigmente mit einem reinen Farbton. Von den heute industriell eingesetzten Pigmenten ist dies im Wesentlichen Bismutvanadat, aber auch die heute in Verruf geratenen Pigmente Cadmiumsulfid, Bleichromat oder Molybdatrot zeigen einen brillanten Farbton bei gleichzeitig gutem Deckvermögen. Dazu kommen vergleichsweise selten eingesetzte Pigmente wie Cobaltblau oder Ultramarin.^[7]

Industrielle Verwendung

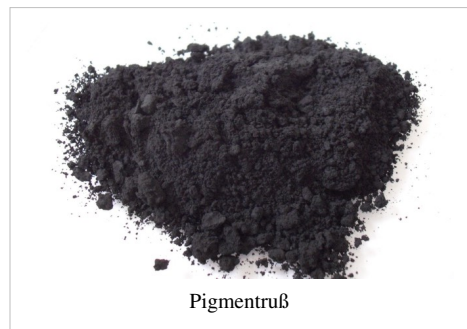
Wegen ihrer industriellen Bedeutung und Verbreitung nehmen die Weißpigmente eine Sonderstellung ein. Alleine in der Papierindustrie werden in Europa weit über 10 Millionen Tonnen pro Jahr verwendet, wobei die Weißminerale mit Calciumcarbonat mit Abstand den größten Anteil haben.

Im Lackbereich ist Weiß von überragender Bedeutung. In Dispersionsfarben ist es die Basisfarbe für Tönsysteme und darüber hinaus der Hauptfarbton. Nach Wert und Produktionsmenge mit etwa 60 % aller Pigmente hat Titandioxid den weitaus größten Anteil.

Weltweit wurden 2006 nahezu 4,5 Millionen Tonnen Titandioxid verbraucht. Diese Position hat das Weißpigment im Laufe der 1960er Jahre erreicht. Titanweiß verdrängte auf Grund seiner Echtheiten das Bleiweiß, dazu kommt ein starker Anstieg der Gesamteinsatzmenge in den Industriestaaten.^[8] Die leicht zugänglichen Eisenoxidpigmente folgen dem Wert nach mit 8 % und nach Produktionsmenge mit 22 % auf Rang 2 der Weltpigmentproduktion, gefolgt von Ruß mit wertmäßig 9 % und 4 % der Menge. Die anderen anorganischen und organischen Pigmente teilen sich in die verbleibende Menge. Durch das wesentlich höhere Preisniveau erreichen diese jedoch fast 30 % nach Wert.^[6]

Unter den weiteren anorganischen Pigmenten sind vor allem Chrom(III)-oxid, Ultramarin, Bismutvanadat und die Gruppe der Mischphasenoxidpigmente bedeutsam.

Calciumcarbonat wird auf Grund seines Brechungsindex vorzugsweise in der Lackindustrie nicht als Pigment, sondern als Füllstoff eingesetzt.^[6]



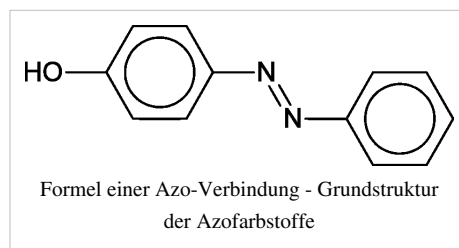
Pigmentruß

Organische Pigmente

Natürliche organische Pigmente

Organische Pigmente kommen in der Natur als „Tier-“ oder „Pflanzenfarben“ vor. Einige solcher Pigmente lassen sich einfach herstellen. Rebschwarz ist ein unvollständig verbranntes Weinholz. Manche historisch wichtige Pigmente, wie das farbkraftige Indischgelb aus Urin von Kühen, verloren ihre Exklusivität durch die breite Palette von synthetischen Pigmenten.

Die lösliche, nahezu farblose Leukoform von Indigo, das Leukoindigo oder Indigoweiß wird durch Oxidation mit Luftsauerstoff zum farbigen unlöslichen Pigment Indigo.



Synthetische organische Pigmente

Synthetischen organische Pigmente werden nach ihrem chemischen Aufbau unterteilt. Die vielfältigste und zugleich größte Gruppe sind die *Azopigmente*. Diese Pigmente machen über 50% der verkauften Menge organischer Pigmente aus. Die andere Gruppe wird zu den *Polycyclischen Pigmenten* oder umgangssprachlich auch *Nichtazopigmenten* zusammengefasst.^[7]

Azopigmente

Azopigmente sind Pigmente, deren Eigenschaft als Chromophor im Wesentlichen durch die Delokalisierung von Elektronen ausgehend von einer Azogruppe (-N=N-) ausgeht. Azopigmente sind also Pigmente, die mindestens eine Azo-Gruppe enthalten.

Die *Azopigmente* werden weiter in Klassen unterteilt, deren Chemie eine grobe Aussage über die Echtheit der Pigmente erlaubt. Die tatsächliche Echtheit hängt im Wesentlichen von den verwendeten Substituenten, aber auch von der Partikelgröße ab. Es wird nach der Anzahl der enthaltenen Azo-Bindungen zwischen Monoazo- und Disazopigmenten unterschieden. Weiter wird nach den jeweiligen Substituenten unterschieden.^[7]

Zu den Monoazopigmenten gehören die einfachen Monoazopigmente, wie die beta-Naphthol-Pigmente sowie die Naphthol AS-Pigmente und die verlackten Azofarbstoffe. Einige der wichtigsten heute eingesetzten organischen Pigmente gehören dieser Gruppe an, gleichzeitig ist es die älteste industriell verfügbare Gruppe. Beispiele sind C.I. Pigment Yellow 1, 3 und 74, C.I. Pigment Orange 5 oder C.I. Pigment Red 112.^[7]

Ein Sonderfall sind die Benzimidazonpigmente, die ihrerseits Monoazopigmente sind und polycyclische Substituenten besitzen. Diese führen zu einer sehr guten Wetterechtheit, so dass diese Pigmente die höchsten Echtheiten innerhalb der Azopigmente erreichen. Beispiele sind C.I. Pigment Yellow 154 oder C.I. Pigment Orange 36.^[7]

Verlackte Pigmente, also mit Metallen in Salze überführte, ursprünglich lösliche Farbstoffe, finden in der Textilfärberei Anwendung. *Farblacken* bedeutet, dass lösliche Farbstoffe als (Färbemittel) auf der Faser durch Umsetzung mit Metallsalzen oder Tannin fixiert werden.

Zu den Disazopigmenten gehören die Diarylgelb-Pigmente (C.I. Pigment Yellow 83), die Disazo-Kondensationspigmente (C.I. Pigment Yellow 128) oder die Acetessigsäureanilid-Pigmente (C.I. Pigment Yellow 155).^[7]

Azo-Metallkomplex-Pigmente sind ein Sonderfall, da sie streng genommen keine echte Azo-Gruppe enthalten.^[7]

Polycyclische Pigmente

Polycyclische Pigmente sind Verbindungen, deren Eigenschaft als Chromophor durch eine Delokalisation von Elektronen über ein mehr oder weniger ausgedehntes Ringsystem erzeugt wird.

Den Hauptanteil der *polycyclischen Pigmente* stellen die Kupferphthalocyaninpigmente, die etwa die Hälfte der polycyclischen Pigmente ausmachen. Die wichtigsten Vertreter dieser Gruppe sind die verschiedenen Typen des Phthalocyaninblaus sowie die halogenierten Typen (Phthalocyaningrün). Weitere wichtige polycyclische Pigmentklassen sind Chinacridone, Diketopyrrolopyrrol-Pigmente, Dioxazine, Perylene, Isoindoline und Inthanthrone.^[7]



Kupferphthalocyanin, ein polycyclisches
Blau pigment

Weitere Gruppen

Neben diesen beiden Substanzgruppen existieren noch eine Reihe organischer Pigmente unterschiedlicher Zusammensetzung. Sie besitzen oft einen speziellen Anwendungsbereich. Aus ökonomischen Überlegungen oder Anforderungen an die Echtheit ist oft nur eine chemische Verbindung dieser Struktur als Pigment geeignet.^[7] Vertreter dieser Gruppe sind verlackte Farbstoffe, die als Salze von Schwermetallen ihre Löslichkeit verloren haben und somit Pigmente sind.

Eigenschaften

Organische Pigmente unterscheiden sich von anorganischen Pigmenten meist durch die höhere Farbstärke, das geringere Deckvermögen, höhere Buntheit (Chroma) und geringere Wetterechtheit. Zudem sind organische Pigmente häufig teurer.

Organische Pigmente sind nachbehandelt, um bestimmte anwendungstechnische Eigenschaften wie die Dispergierbarkeit oder das Deckvermögen zu verbessern. Durch die Nachbehandlung wird zudem die Partikelgröße eingestellt, die verantwortlich für Echtheitsniveau, Farbstärke und die Feineinstellung der Koloristik ist.

Toxikologie

Hinsichtlich der Toxikologie von organischen Pigmenten gilt zusammenfassend, dass diese Pigmente für sich genommen aufgrund ihrer schweren Löslichkeit physiologisch gesehen als praktisch inert gelten. Gesundheitliche Bedenken ergeben sich vornehmlich aus ihrem Staubcharakter (Feinstaub). Organische Pigmente gelten als biologisch praktisch nicht abbaubar. Da Pigmente im Zwischen- oder Endprodukt unter Verwendung von Dispergiermitteln, Bindemitteln, Lösemitteln und/oder dergleichen eingesetzt werden, ist gegebenenfalls die toxikologische Wirkung dieser Stoffe zu berücksichtigen.^{[9] [10] [11]} Toxikologisch bedenklich können Abbauprodukte von Pigmenten sein. Solche Abbauprodukte von Pigmenten treten beim Bestrahlen mit Laserlicht auf. Diese Anwendung findet statt, um Farbpigmente aus Tätowierungen zu entfernen. Bei der Spaltung des Tätowierungspigments C.I. Pigment Red 22 durch Laserlicht entsteht das giftige und krebserregende 2-Methyl-5-nitroanilin.^[12]

Abgrenzung

Nicht zu den Pigmenten zählen Säure-Base-Indikatoren: Es sind Farbstoffe, deren Farbe sich mit dem pH-Wert der Lösung ändert: Sie zeigen bei Zugabe von Säuren oder Basen einen Farbumschlag (siehe unter Indikator (Chemie) und Titration). *Substratfarben* bestehen aus einer farbtonegebenden Komponente und einem mehr oder weniger farblosen Pigment, dem Substrat. Beide Komponenten werden in einem Umwandlungsprozess wasser- und bindemittelunlöslich aneinander gebunden. In der Antike und im Mittelalter wurden meist Pflanzenfarbstoffe (Färberpflanze) auf ein weißes Substrat wie Kreide oder Bleiweiß aufgezogen; dabei wurden Beizstoffe wie Alaun und Soda zugesetzt, die die Verbindung zwischen Farbstoff und Substrat verbesserten.

Effektpigmente

→ Hauptartikel: *Effektpigment*

Metalleffektpigmente

Messing und Aluminium sind mit Abstand die wichtigsten Pigmente zur Erzeugung eines *Metall-Effektes*. Farben erhalten durch Messingpartikel einen goldenen Anschein, während Aluminium einen silbrigen erzeugt. Früher gebräuchliche Bezeichnungen sind auch Silberbronze für Aluminiumpigmente und *Goldbronze*, *Bleichgold*, *Reichbleichgold* und *Reichgold* für Messingpigmente. Die genaue Bezeichnung war abhängig vom Farbton, also letztendlich von der Zusammensetzung der Legierung.

Der optische Eindruck ist winkelabhängig. In der Draufsicht (nahezu lotrecht) ist das heller erscheinende Metalleffektpigment zusehen, während unter einem flachen Winkel der meist dunkel eingestellten Basisfarbton zu sehen ist. Dieser Effekt wird als Flop oder Flip-Flop bezeichnet. Er wird durch die plättchenförmige Form der Teilchen erzielt. Aluminiumblättchen in einer pigmentgeeigneten Partikelgröße ergeben Silberglanz, bei nahezu kugeligen Teilchen gleicher Teilchengröße ist die Oberfläche einheitlich grau. Die Farbtiefe steht mit der Korngröße in Beziehung.

Das genaue Erscheinungsbild des Pigmentes wird im Wesentlichen von der Teilchengröße und der Regelmäßigkeit der Teilchenform bestimmt. Grobe Partikel erzeugen dabei einen glitzernden Eindruck, der als *Sparkle* bezeichnet wird. Feinteilige Partikel erzeugen einen sanfteren Flop, also einen weicheren Übergang bei Änderung des Betrachtungswinkels. Zur Erzielung des gewünschten Effekts werden oft beide Typen zugleich verwendet.

Da unbehandelte Aluminiumpigmente insbesondere in wässrigen Systemen und unter Bewitterungseinfluss nur mäßig stabil sind, wurden oberflächenbehandelte Marken entwickelt, die diesen Nachteil ausgleichen.

Perlglanzpigmente



Sie bestehen aus plättchenförmigen Trägersubstraten, meist natürlicher Glimmer oder sehr dünnen Glasplättchen, die in speziellen Prozessen mit einer oder mehreren äußerst dünnen und sehr gleichmäßigen Oxidschichten beschichtet werden. Die Schichten können beispielsweise aus Siliciumdioxid, Titandioxid, Eisen(III)-oxid oder Zirkoniumdioxid bestehen. Als Beschichtungsverfahren werden im wesentlichen Sol-Gel-, CVD oder PVD-Verfahren eingesetzt. Die erzeugten Schichtstärken liegen dabei im Bereich von etwa 100 nm. Beim Herstellungsverfahren ist die präzise Kontrolle der Beschichtungsstärke (auf etwa ± 3 nm) und deren Homogenität entscheidend.

Durch die geschickte Wahl des Beschichtungsparameter, wobei v. a. die Brechzahl, Schichtstärke und Schichtfolge wichtig sind, können durch den Effekt der Interferenz nahezu beliebige Farben und Farbtöne realisiert werden. Unter bestimmten Bedingungen können blickwinkelabhängige Farben (Farb-Flop) erzeugt werden. Je nach Betrachtungswinkel nimmt der Betrachter einen anderen Farbton war. Diese Pigmente werden als Interferenzpigmente bezeichnet.

Im Bild ist ein mit einem Interferenzpigment beschichtetes Blech gezeigt, bei dem ein Farb-Flop von Blau nach Gold zu sehen ist. Der Effekt ist erst nach Ausrichtung der Pigmentteilchen zu sehen, wie ein Vergleich mit dem pulverförmigen Pigment beweist.

Perlglanzpigmente sind gesundheitlich unbedenklich. Sie sind von der FDA zum Einfärben von Lebensmitteln zugelassen.

Leuchtpigmente

Leuchtpigmente lassen sich in Fluoreszenzpigmente für Tagesleuchtfarben („Neonfarben“) und phosphoreszierende Stoffe für Nachleuchtfarben unterscheiden. Sie werden in sogenannten Leuchtfarben eingesetzt. Üblicherweise bestehen Fluoreszenzpigmente aus in eine Matrix eingearbeiteten Fluoreszenzfarbstoffen, die dadurch Pigmenteigenschaften erhalten. Als Nachleuchtpigmente werden dotierte anorganische Stoffe mit Phosphoreszenz genutzt. Hierzu gehören zum Beispiel die grünen Leuchtpigmente auf Zinksulfidbasis, mit denen unter Anderem Fluchtwege markiert werden.

Radioaktive Leuchtmittel sind dagegen Selbstleuchter. Sie werden daher nicht zu den Pigmenten gezählt, obwohl sie unlöslich sind.

Normen

- EN ISO 4618 *Beschichtungsstoffe: Begriffe*
- DIN 55943 *Farbmittel: Begriffe*
- DIN 55944 *Farbmittel: Einteilung nach koloristischen und chemischen Gesichtspunkten*

Literatur

- G. Buxbaum, G. Pfaff (Hrsg.): *Industrial Inorganic Pigments*, 3. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim 2005
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): *DIN-Taschenbuch 157: Farbmittel 2. Pigmente, Füllstoffe, Farbstoffe*. Beuth Verlag GmbH, Berlin/Wien/Zürich, 3. Aufl. 1997
- W. Herbst, K. Hunger: *Industrial Organic Pigments – Production, Properties, Applications*. 3. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim 2004
- Karin Lutzenberger: *Künstlerfarben im Wandel – Synthetische organische Pigmente des 20. Jahrhunderts und Möglichkeiten ihrer zerstörungsarmen, analytischen Identifizierung*, Herbert Utz Verlag, München 2009, ISBN 978-3-8316-0903-1
- Gerhard Pfaff: *Perlglanzpigmente*, Chemie in unserer Zeit, VCH Verlagsgesellschaft mbH, Januar 1997
- H. Smith (Hrsg.): *High Performance Pigments*. Wiley-VCH, Weinheim 2002
- Temple C. Patton (Hrsg.): *Pigment Handbook* in 3 Bänden. A Wiley-Interscience Publication, New York London Sydney Toronto 1993
- Kurt Wehlte: *Werkstoffe und Techniken der Malerei*, Otto Maier Verlag, Ravensburg 1967, ISBN 3-473-48359-1



Farbflop eines Effektlackes von Blau nach Gold



Interferenzpigment blau-gold

Weblinks

- Volkert Emrath: *Differenzierung von Farbmitteln* ^[13]
- Thomas Seilnacht: *Lexikon der Pigmente und Farbstoffe* ^[30]
- Bruce MacEvoy: *Paints. How watercolor paints are made* ^[14]. In: *Handprint. Watercolors* ^[15]. (englisch)
- Kremer Pigmente GmbH & Co. KG: *Viele Informationen zu historischen Pigmenten und deren Verwendung* ^[16]

Einzelnachweise

- [1] vergl. DIN 55943:2001-10 *Farbmittel - Begriffe*
- [2] F. Tragor; StoArk 02/2006, S. 52
- [3] Marktstudie Pigmente von Ceresana Research (<http://www.ceresana.com/de/marktstudien/additive/Pigmente>)
- [4] *Market Report: World Pigment Market* (<http://www.acmite.com/market-reports/chemicals/world-pigment-market.html>). Acmite Market Intelligence (<http://www.acmite.com/>). Abgerufen am 11. Dezember 2010.
- [5] DIN 55943
- [6] G. Pfaff: *Industrial Inorganic Pigments*. Wiley VCH
- [7] W. Herbst, K. Hunger, *Industrial Organic Pigments*, 2nd edn., Wiley-VCH, Weinheim **1997**
- [8] Temple C. Patton: *Pigment Handbook. Volume I: Economics*. John Wiley & Sons, New York
- [9] F. Leuschner, *Toxicology Letters*, 2, S.253-260, **1978**
- [10] R. Anliker, E.A. Clarke, *Chemosphere*, 9, S.595-609, **1980**
- [11] W. Herbst, K. Hunger, *Industrial Organic Pigments*, 2nd edn., Wiley-VCH, Weinheim **1997**
- [12] E. Engel, R. Vasold, W. Bäumler, *Tätowierungspigmente im Fokus der Forschung*, in *Nachrichten aus der Chemie*, 55, S.847–849, **2007** (http://books.google.com/books?id=rppgIYo_IOWC&pg=PA56&lpg=PA56&dq=E.+Engel,+R.+Vasold,+W.+B  mmler,+  T  t  wierungspigmente+im+Fokus+der+Forschung+  ,+in+  Nachrichten+aus+der+Chemie+  ,+  55+  ,+S.847  849,+  2007+  &source=bl&ots=io_mIPCPiR&sig=4eL3Qd34TiXKebq4L5ofq-GXj1g&hl=de&ei=m9UDTfifNo_rOfaR9KYB&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=2&ved=0CB0Q6AEwAQ#v=onepage&q=E.Engel,+R.Vasold,+W.B  mmler,+  T  t  wierungspigmente+im+Fokus+der+Forschung+  ,+in+  Nachrichten+aus+der+Chemie+  ,+  55+  ,+S.847  849,+  2007+  &f=false)
- [13] <http://www.emrath.de/ordnen.htm>
- [14] <http://www.handprint.com/HP/WCL/color1.html>
- [15] <http://www.handprint.com/HP/WCL/pigmt1.html#pigmenttypes>
- [16] <http://www.kremer-pigmente.de/de>

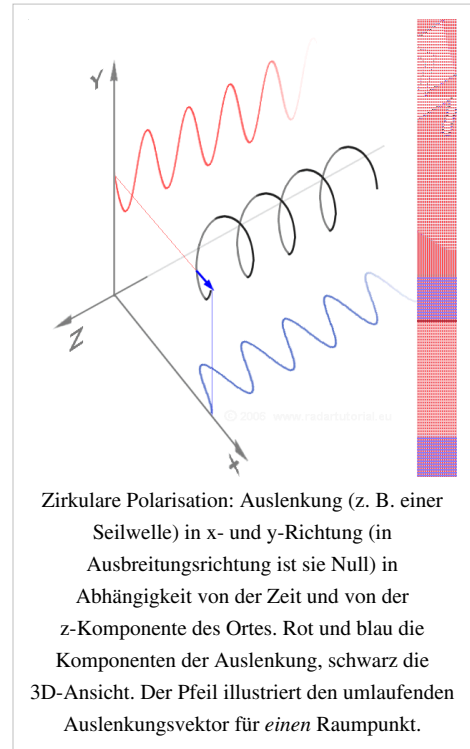
Polarisation

Die **Polarisation** einer Transversalwelle beschreibt die Richtung ihrer Schwingung. Ändert sich diese Richtung schnell und ungeordnet, spricht man von einer unpolarisierten Welle. Der Polarisationsgrad gibt den geordneten Anteil an. Bei in Ausbreitungsrichtung schwingenden Wellen, sogenannten Longitudinalwellen, gibt es keine Polarisation.

Bauelemente, die unpolarisiertes Licht polarisieren sollen bzw. polarisiertes Licht abhängig von der Art und Richtung der Polarisation aufteilen oder unterdrücken, heißen Polarisor.

Polarisationsarten

- **Lineare Polarisation:** Die Richtung der Schwingung ist konstant. Die Auslenkung aus der Ruhelage (im Fall der mechanischen Welle eine Verschiebung quer zur Ausbreitungsrichtung) ändert periodisch ihren Betrag und ihr Vorzeichen. Die Richtung in Bezug auf eine bestimmte Ebene kann als Winkel angegeben werden (bei seismischen Wellen üblich) oder als Anteil der beiden Komponenten *parallel* bzw. *senkrecht*. Für elektromagnetische Wellen siehe das folgende Kapitel.
- **Zirkulare Polarisation** (im 19. Jahrhundert als *drehende Polarisation* bezeichnet): Der Betrag der Auslenkung ist (abgesehen von Modulation) konstant, ihre Richtung ändert sich innerhalb der senkrecht zum Wellenvektor stehenden Ebene (der xy-Ebene im Bild) mit konstanter Winkelgeschwindigkeit. Für den Drehsinn siehe Helizität.
- **Elliptische Polarisation** ist eine Mischform. Die Auslenkung beschreibt dabei eine Ellipse.



Polarisation elektromagnetischer Wellen

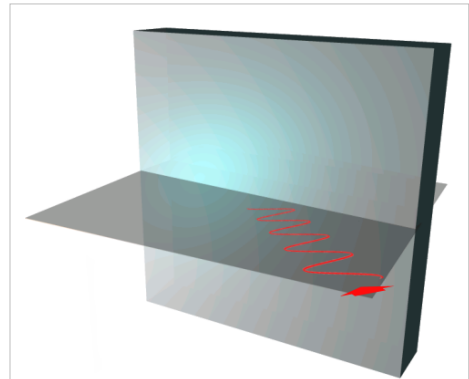
Elektromagnetische Strahlung (Licht, Radiowellen usw.) ist meist eine Transversalwelle mit jeweils rechten Winkeln zwischen dem Wellenvektor \vec{k} , der in Ausbreitungsrichtung zeigt, und den Vektoren des elektrischen und magnetischen Feldes, \vec{E} bzw. \vec{B} . Es ist willkürlich, ob als Polarisationsrichtung die Schwingungsrichtung des elektrischen oder des magnetischen Feldes gewählt wird. Aus der Zeit, als Licht noch als mechanische Schwingung des hypothetischen Äthers erklärt wurde, stammt eine Festlegung für die Bezeichnungen der beiden Polarisationsrichtungen, die sich später als die Schwingungsrichtung des magnetischen Feldvektors herausstellte.^[1]

Da die meisten Wechselwirkungen elektromagnetischer Strahlung mit Materie allerdings elektrischer Natur sind, wird die Polarisationsrichtung heute meist auf den elektrischen Feldvektor bezogen.

Wenn die Welle gebrochen, reflektiert oder gestreut wird, ist die Bezugsebene für die Bezeichnungen *parallel* und *senkrecht* jene Ebene, in der ein- und auslaufende Welle liegen. Bei Funkwellen mit Bezug auf die Erdoberfläche heißen die Komponenten *horizontal* bzw. *vertikal*.

Man spricht bei Reflexion von *TM-polarisiertem* Licht, wenn die Schwingungsebene des magnetischen Feldes senkrecht zu der durch Einfallsvektor und Flächennormale aufgespannten Ebene liegt (TM = transversal magnetisch; man spricht hierbei auch von *parallel*-, *p*- oder π -*polarisiertem* Licht), und von *TE-polarisiertem* Licht, wenn das elektrische Feld senkrecht auf dieser Ebene steht (TE = transversal elektrisch; man spricht hierbei auch von *senkrecht*-, *s*- oder σ -*polarisiertem* Licht). In Richtung des Brewster-Winkels wird TM-polarisiertes Licht verstärkt in das Medium gebrochen anstatt reflektiert, das heißt, auch für unpolarisiertes einfallendes Licht ist das beim Brewster-Winkel ausfallende Licht immer TE-polarisiert. Beide Begriffe sind nur im Zusammenhang mit der reflektierenden Fläche definiert.

Für die Erzeugung und Analyse von polarisierten elektromagnetischen Wellen siehe Polarisator und Polarisation (Antennen).



Bezeichnung der Richtung linearer Polarisation elektromagnetischer Wellen bei Vorgängen mit Richtungsänderung des Lichtstrahls (hier Reflexion an einem Spiegel): *Parallele Polarisation* bedeutet, dass die elektrische Komponente in der Einfallsebene schwingt.

Unpolarisiertes und polarisiertes Licht in der Natur

Das meiste in der Natur vorkommende Licht ist als thermische Strahlung zunächst unpolarisiert. Durch Reflexion oder Streuung entsteht daraus teilpolarisiertes Licht.

Schräge Reflexion an Grenzflächen, z. B. an einer Wasseroberfläche, trennt Licht teilweise nach seiner Polarisationsrichtung auf. Der in der Reflexionsebene polarisierte Anteil dringt eher ein, der dazu senkrechte Anteil wird eher reflektiert. Für die quantitative Abhängigkeit vom Einfallswinkel siehe Fresnelsche Formeln.

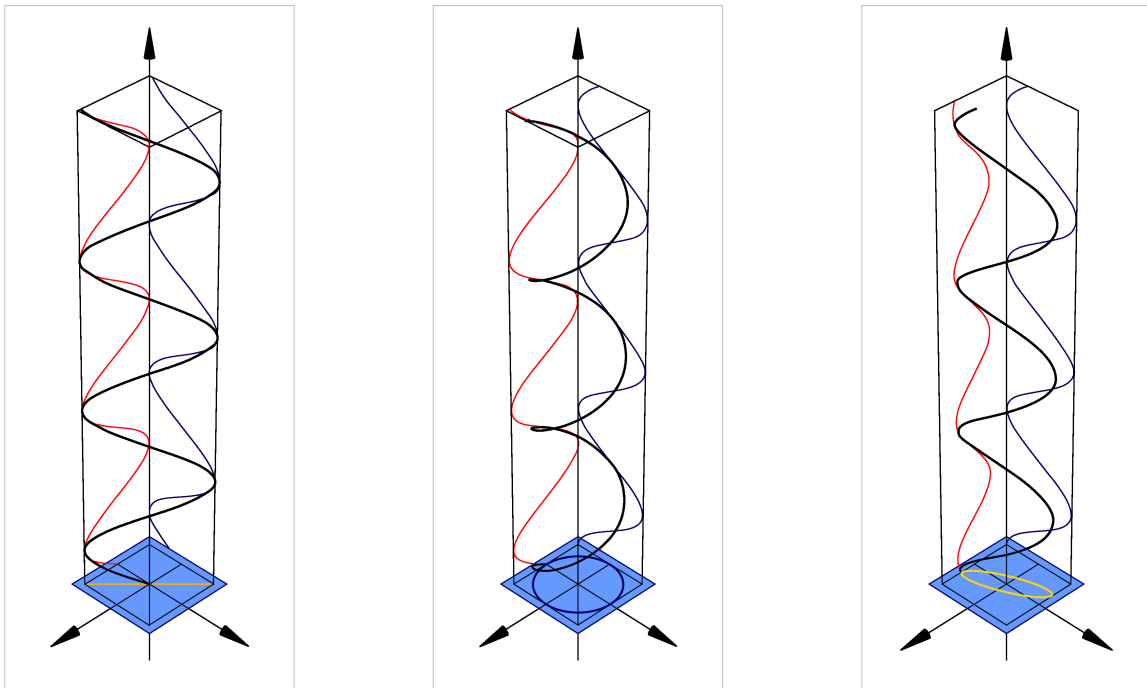
Das blaue Licht des Himmels ist von Molekülen und statistischen Dichteschwankungen der Luft gestreutes Sonnenlicht. Die Luft wird durch die einfallende Welle elektrisch polarisiert, in zufällige Richtungen senkrecht zur Einfallrichtung. Streulicht in Richtungen dieser Schwingungsebene (Streuwinkel 90°) schwingt in eben dieser Ebene, ist also vollständig polarisiert. Für die Abhängigkeit vom Streuwinkel siehe Rayleighstreuung.

Wahrnehmung von polarisiertem Licht

Viele Insekten können linear polarisiertes Licht nach seiner Polarisationsrichtung unterscheiden und nutzen diesen Effekt, um sich zu orientieren. Für die Honigbiene wurde dies durch Karl von Frisch erforscht. Auch Fangschreckenkrebe sind dazu in der Lage^[2] sowie Menschen, allerdings mit sehr geringem Kontrast, siehe Haidinger-Büschel.

Mathematische Beschreibung der Polarisation

Zusammensetzung einer linear, zirkular bzw. elliptisch polarisierten Welle (schwarz) aus linear polarisierten Komponenten (rot und blau)



Jede beliebige Polarisation kann als Überlagerung zweier Basispolarisationen dargestellt werden. In zirkularpolarisiertem Licht zeigen die Spins aller Photonen in dieselbe Richtung, je nach Helizität entweder in oder gegen die Ausbreitungsrichtung. Dennoch kann auch ein einzelnes Photon linearpolarisiert werden, indem zwei entgegengesetzt zirkularpolarisierte Zustände überlagert werden.

Ungeachtet dessen ist es aber möglich und üblich, zirkular polarisierte Wellen als Überlagerung linear polarisierter Komponenten darzustellen. Beiden Varianten gemeinsam ist die Angabe von Amplitudenverhältnis und relativer Phasenlage:

1. Zwei linear polarisierte Wellen, deren Polarisationsrichtungen senkrecht aufeinander stehen, werden überlagert. Abhängig von der Phasenbeziehung und dem Amplitudenverhältnis der beiden Wellen ergeben sich folgende Ausgangspolarisationen:
 - Bei verschwindender Phasendifferenz (oder einer Phasendifferenz, die einem Vielfachen von π entspricht) und unterschiedlicher Amplitude ist die Ausgangspolarisation linear und die Richtung hängt vom Amplitudenverhältnis ab.
 - Bei einem Phasenunterschied von $\pi/2$ und gleichen Amplituden ist die Ausgangspolarisation zirkular.
 - In jedem anderen Fall ist die Ausgangspolarisation elliptisch.
2. Zwei zirkular polarisierte Wellen, eine rechts- und eine linksdrehend, werden überlagert. Abhängig von der Phasenbeziehung und dem Amplitudenverhältnis der beiden Wellen ergeben sich folgende Ausgangspolarisationen:

- Bei gleichen Intensitäten und variabler Phasendifferenz ist die Ausgangspolarisation linear und die Richtung hängt von der Phasenlage der Basispolarisationen ab.
- Wenn eine der Basispolarisationen eine verschwindende Amplitude hat, ist die Ausgangspolarisation die jeweils andere zirkulare Polarisation.
- In jedem anderen Fall ist die Ausgangspolarisation elliptisch.

Ist auch die absolute Intensität und der Polarisationsgrad von Interesse, so sind insgesamt vier Angaben notwendig, als vierdimensionaler reellwertiger Stokes-Vektor oder als zweidimensionaler komplexwertiger Jones-Vektor. Quasimonochromatisches Licht kann alternativ auch durch die Kohärenzmatrix beschrieben werden. Die Beschreibung der Wirkung eines polarisationsverändernden optischen Elementes erfolgt dann durch Multiplikation mit einer entsprechenden Müller-Matrix beziehungsweise einer Jones-Matrix.

Einzelnachweise

- [1] Eduard Von Hartmann: *Die Weltanschauung der Modernen Physik*. Hermann Haacke Verlagsbuchhandlung, Leipzig, 1902 (Eingeschränkte Vorschau (<http://books.google.de/books?id=cWdkR6tMvOIC&pg=PA131>) in der Google Buchsuche).
- [2] www.fangschreckenkrebs.de (<http://www.fangschreckenkrebs.de/wissenswertes/augen/index.html>)

Weblinks

- Polarisation bei atomaren Übergängen (http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/software/hydrogenlab/elektronium/HTML/galerie_uebergaenge_de.html)
- Animation von Zirkularwellen mit Polarisator (<http://www.schulphysik.de/java/physlet/applets/emwelle2.html>) (benötigt Java)

Videos

- Video vom „anderthalb Lexikon“ über Polarisation (langsame Verbindung (http://www.uni-heidelberg.de/media/physik/polarisation_isdn.rmm); schnelle Verbindung (http://www.uni-heidelberg.de/media/physik/polarisation_lan.rmm))

Prisma (Optik)

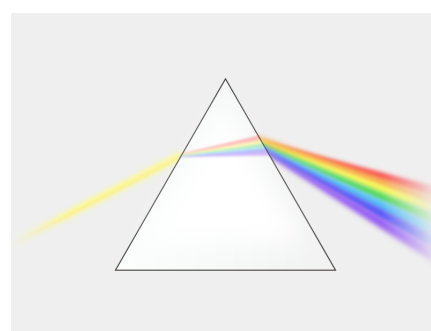
Unter einem **Prisma** wird in der Optik vorwiegend eine spezielle Form des geometrischen Körpers Prisma verstanden, nämlich ein gerades Prisma mit einem Dreieck als Grundfläche. Seine optischen Eigenschaften hängen im Wesentlichen von den Dreieckswinkeln und von der Brechzahl des Werkstoffes (Glas oder transparenter Kunststoff) ab.

Anwendungen

Die Hauptanwendungen des Prismas beruhen auf seiner Eigenschaft, Licht wellenlängenabhängig zu brechen oder total zu reflektieren, je nach Bauart des Prismas.



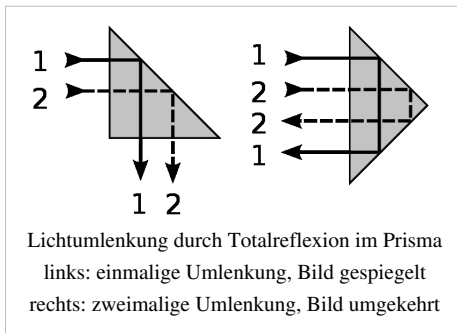
Prisma mit gleichseitigem Dreieck als Grundfläche



Lichtbrechung im Prisma, schematisch



Lichtbrechung im Prisma
Teilreflexion an beiden brechenden Flächen als Nebeneffekt



Lichtbrechung:

- In einem Prismenspektrometer wird das Licht an der Eintritts- und an der Austrittsfläche abhängig von der Wellenlänge gebrochen. Man gewinnt ein Spektrum der Lichtquelle. Die beiden beteiligten Flächen gemeinsame Kante heißt die *ablenkende* oder *brechende Kante*, bezüglich der das Licht in die Gegenrichtung abgelenkt wird.
- Die Ablenkung des gebrochenen Lichtes ist bei symmetrischem Durchgang minimal. Dieser Effekt wird zur (wellenlängenabhängigen) Bestimmung der Brechzahl genutzt. Die Formel dafür lautet.

$$n = \frac{\sin \frac{\delta_{\min} + \varepsilon}{2}}{\sin \frac{\varepsilon}{2}}$$

mit:

n = Brechzahl des Materials für das verwendete monochromatische Licht

δ_{\min} = minimaler Ablenkungswinkel

ε = Prismenwinkel (zwischen Ein- und Austrittsfläche)

- In einem Prisma aus einem doppelt brechenden Material wird Licht in verschieden zueinander polarisierte Strahlen getrennt. Das bekannteste solcher Prismen ist das Nicolsche Prisma, das aus zwei Dreieckprismen besteht.

Lichtumlenkung durch Totalreflexion:

- Trifft ein Lichtstrahl schräger als beim Prismenspektrometer auf die Austrittsfläche, so kann es dort total reflektiert werden. In mehreren optischen Instrumenten nutzt man diesen Effekt zur gezielten Lichtumlenkung, wobei das Licht rechtwinklig auf die Eintritts- und die Austrittsfläche trifft, um ein Dispergieren zu vermeiden. Bei Prismenferngläsern wird auf diese Weise das Bild aufgerichtet (Umkehrprisma). Das Pentaprisma hat ein Fünfeck als Grundfläche. Es wird zur 90°-Umlenkung benutzt, wobei das Bild seitenrichtig bleibt. Beim Pentadachkantprisma ist eine der vier spiegelnden Flächen durch zwei zueinander rechtwinklige Flächen ersetzt, wodurch das Bild gespiegelt wird. Es wird in Spiegelreflexkameras angewendet, um das durch deren Spiegel verkehrte Bild zu korrigieren.

Prismendioptrie

Als Maß für die Stärke eines Prismas wurde früher der Begriff *Prismendioptrie* verwendet (Einheit = *pdptr*). Er wird definiert durch den Grad der Ablenkung eines Lichtstrahls in einem Meter Entfernung, gemessen in Zentimeter (cm/m). Demnach ist 1 *pdptr* die Ablenkung eines Lichtstrahls um 1 cm in 1 m Entfernung.^[1]

Typen von Prismen

- Abbe-Prisma
- Achromatisches Prisma (siehe Achromatismus)
- Ahrenssche Prisma
- Brewster-Prisma
- Biprisma
- Dachkantprisma
- Bauernfeind-Prisma
- Dove-Prisma
- Foucaultsches Prisma
- Geradsichtprisma
- Glan-Thompson-Prisma
- Nicolsches Prisma
- Pellin-Broca-Prisma
- Pantehaprisma
- Porro-Prisma
- Porro-Abbe-Prisma
- Wollaston-Prisma

Weblinks

- www.dorotek.de/cms/upload/pdf/optik/deutsch/Prismen Übersicht über verschiedene Prismentypen ^[2]
- Lerneinheit zur Brechung des Lichts am Prisma ^[3]
- interaktives Arbeitsblatt „Prisma“ ^[4]

Einzelnachweise

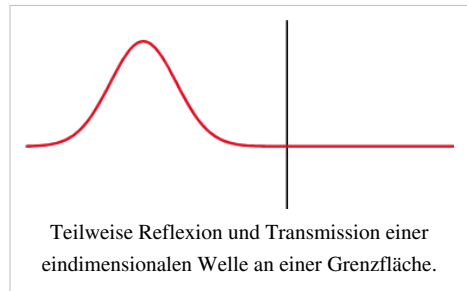
- [1] Theodor Axenfeld, Hans Pau: *Lehrbuch und Atlas der Augenheilkunde*. Gustav Fischer, Stuttgart 1980, ISBN 3-437-00255-4.
- [2] <http://www.dorotek.de/cms/upload/pdf/optik/deutsch/Prismen.pdf>
- [3] <http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ph/14/ep/einfuehrung/geooptik/brechung.vlu/Page/vsc/de/ph/14/ep/einfuehrung/geooptik/brechung4.vscml.html>
- [4] http://www.geogebra.org/de/upload/files/dynamische_arbeitsblaetter/lwolf/brechung/prisma.html
-

Reflexion (Physik)

Reflexion (lat. *reflectere*: zurückbeugen, drehen) bezeichnet in der Physik das Zurückwerfen von Wellen (elektromagnetischen Wellen, Schallwellen, etc.) an einer Grenzfläche, das heißt dort, wo sich der Wellenwiderstand (oder bei Lichtstrahlen die Brechzahl) des Mediums ändert.

Bei glatten (also gegenüber der Wellenlänge kleinen Rauigkeitsstrukturen) Oberflächen gilt das **Reflexionsgesetz**, man spricht hier von einer **gerichteten Reflexion**. An rauen Oberflächen wird die Strahlung diffus zurückgestreut und gehorcht dann näherungsweise dem lambertschen Strahlungsgesetz.

In der Regel wird bei der Reflexion nur ein Teil der einfallenden Welle reflektiert, man spricht in diesem Zusammenhang auch von *partieller Reflexion* (teilweiser Reflexion). Der restliche Anteil der Welle breitet sich im zweiten Medium weiter aus, durch den geänderten Wellenwiderstand erfährt die Welle dabei eine Richtungs- (Brechung) und Geschwindigkeitsänderung. Der Brechungswinkel lässt sich mit dem Brechungsgesetz und die Stärke der Reflexion und Transmission mit den fresnelschen Formeln berechnen – abhängig von Wellenwiderstand und Polarisation.

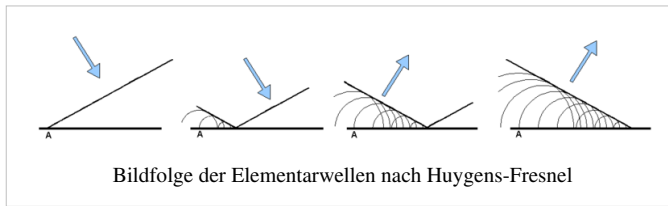


Ein Spezialfall der Reflexion ist die Totalreflexion, bei der die Welle beim Einfall auf ein Medium mit niedrigerem Wellenwiderstand vollständig an der Grenzfläche reflektiert wird. Genau betrachtet tritt dies nur bei ideal transparenten Medien auf. Ist beispielsweise das zweite Medium in einem bestimmten Frequenzbereich absorbierend, kommt es zur sogenannten *abgeschwächten Totalreflexion*, bei der sich das Reflexionsverhalten in diesem Bereich ändert. Angewendet wird die Totalreflexion beispielsweise bei der Retroreflexion (Reflexion einer Welle in Richtung der Quelle).



Wasserspiegelung (Reflexion) des Matterhorns

Reflexion im Wellenmodell

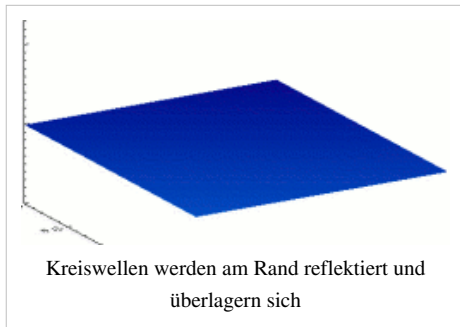


Eine auftreffende Wellenfront erzeugt kreisförmige Elementarwellen um den jeweiligen Auftreffpunkt (Huygenssches Prinzip), deren Radius r sich proportional zur Zeit t vergrößert:

$$r = c \cdot t$$

wobei c die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle im betreffenden Medium ist.

In den folgenden Bildern sieht man, wie die Radien der zuerst entstandenen Kreise anwachsen, während der aktuelle Auftreffpunkt nach rechts wandert. Die Tangente an die Kreise stellt eine neue Wellenfront dar, welche die reflektierende Ebene nach rechts oben verlässt. Die Winkel zwischen Wellenfront und Ebene sind gleich (Reflexionsgesetz).



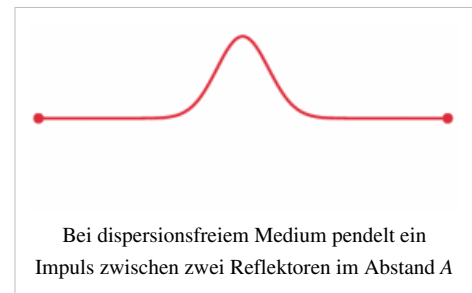
Anmerkung: Auch auf der Unterseite des Spiegels entstehen Elementarwellen. Wenn sie sich dort – im Regelfall mit anderer Geschwindigkeit c – ausbreiten können, spricht man von Brechung.

Reflexion einzelner Impulse

Ein Impuls beliebiger Kurvenform ist ein Wellenpaket, das nach den Regeln der Fourieranalyse in eine Summe von Sinusschwingungen unterschiedlicher Wellenlänge λ zerlegt werden kann. Zwischen zwei Reflektoren im Abstand A sind nur solche erlaubt, für die gilt:

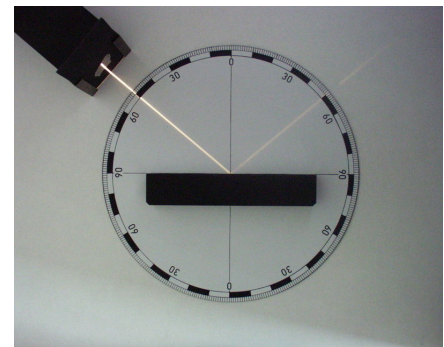
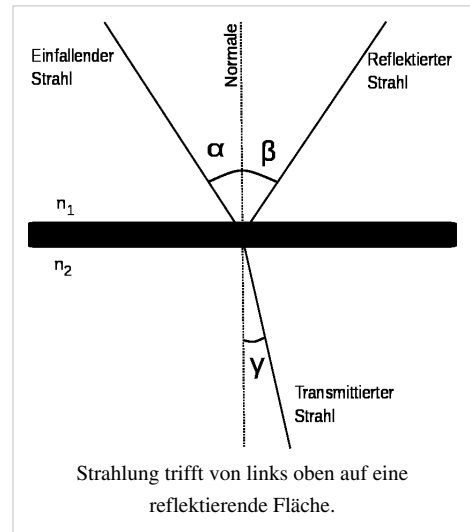
$$A = n \cdot \frac{\lambda}{2}$$

wobei n eine natürliche Zahl ist. Unter bestimmten Voraussetzungen bleibt die Kurvenform des daraus zusammengesetzten Impulses gleich und dieses Soliton kann ungedämpft zwischen den beiden Reflektoren pendeln, wie im Bild zu sehen ist. Durch Vergleich dieser Pendeldauer mit den exakten Zeitmarken einer Atomuhr kann man extrem hohe Frequenzen bestimmen (Frequenzkamm).



Reflexionsgesetz

Das Reflexionsgesetz besagt, dass der Ausfallswinkel (auch Reflexionswinkel) genau so groß wie der Einfallswinkel ist, $\alpha = \beta$, und beide mit dem Lot in einer Ebene, der Einfallsebene, liegen. Im Fall von Wellen muss dabei die Wellenlänge erheblich größer sein als die Abstände zwischen den Streuzentren (beispielsweise Atome). Andernfalls kann es zur Ausbildung mehrerer „Reflexionsstrahlen“ kommen,^[1] beispielsweise bei Röntgenstrahlen, die an einem Kristall reflektiert werden (siehe Röntgenbeugung).



Lichtreflexion.

Gerichtete Reflexion

Das Wellenfeld an einer gerichtet reflektierenden Fläche lässt sich durch „Spiegelquellen“ beschreiben. Zu jeder Originalquelle wird hierbei eine Spiegelquelle hinter der reflektierenden Fläche „angebracht“, mit dem gleichen Abstand zur reflektierenden Fläche wie die Originalquelle. Das Wellenfeld ergibt sich durch Überlagerung der Wellenfelder von Original- und Spiegelquellen.

Anwendungen findet die gerichtete Reflexion in ebenen und nicht ebenen Spiegeln, beispielsweise konkav gekrümmte Hohlspiegel als Rasierspiegel oder bei optischen Teleskopen bestimmter Bauart, den Spiegelteleskopen. Konkav gekrümmte Spiegel dienen zum Beispiel als Außenspiegel an Fahrzeugen und zeigen größere Bereiche als gleich große Planspiegel.



Computergenerierte Spiegelung an mehreren Bällen

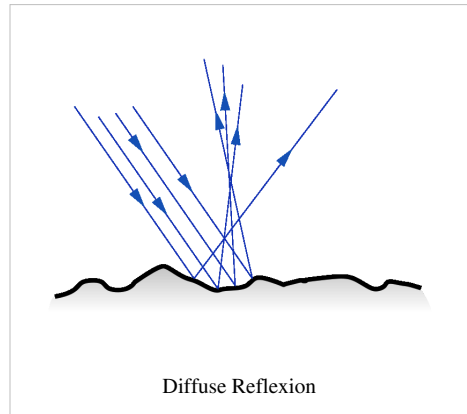
Diffuse Reflexion

Grenzflächen mit einer großen Rauheit relativ zur Wellenlänge reflektieren diffus. Enthält das Material viele Streuzentren, folgt die Reflexion dem Lambertschen Gesetz. Die Haupttrückstreuung erfolgt dann senkrecht zum Material, unabhängig von der Einstrahlungsrichtung. Beispiele sind Milch, Wandfarbe oder Papier. Bei Milch haben die Fetttropfen im Wasser die Größenordnung der Wellenlänge des sichtbaren Lichtes und bilden die Streuzentren für Lichtwellen, gleiches gilt für die Luft einschlüsse zwischen den Fasern bei Papier.

Anwendungen diffuser Reflexion, also der gleichmäßigen Verteilung von Licht, sind z. B.

- Ulbricht-Kugel,
- Projektionsschirm,
- Vermeidung spiegelnder Reflexe an Bildschirmen und fotografischen Abzügen.

Die Summe spiegelnder und diffuser Reflexion wird auch Remission genannt, bezogen auf die eingestrahlte Lichtmenge Remissionsgrad. Für nicht perfekt diffus streuende, gekrümmte und womöglich farbstichige Oberflächen gibt es unterschiedliche Möglichkeiten der Definition. Im Bereich der Meteorologie und Astronomie siehe Albedo, die Industrie benutzt verschiedene Definitionen des Weißgrades.



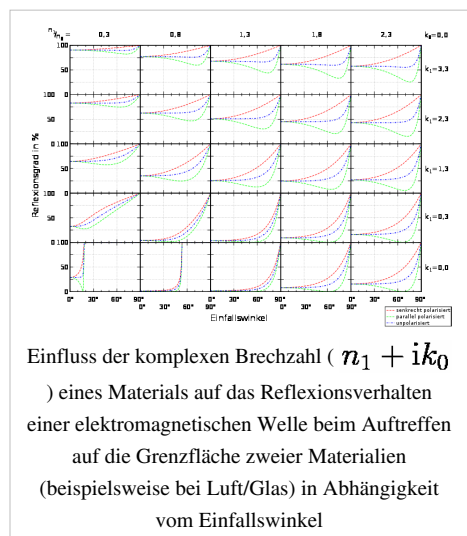
Diffuse Reflexion

Reflexion elektromagnetischer Wellen

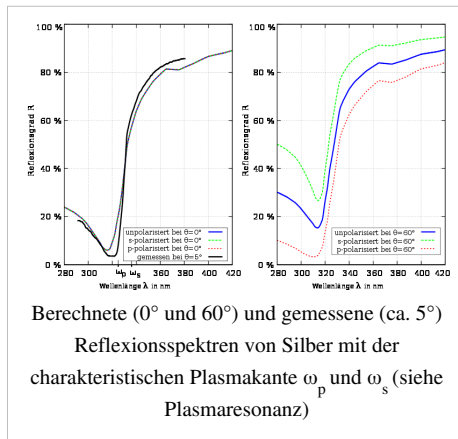
Im Folgenden soll die Reflexion am Beispiel elektromagnetischer Wellen erklärt werden. Zum einfacheren Verständnis wird dabei das Strahlmodell der geometrischen Optik genutzt.

In der Schemazeichnung (siehe Reflexionsgesetz) trifft ein Strahl von links oben auf die Oberfläche eines Mediums mit anderen Strahlungsausbreitungseigenschaften. Ein Teil der Strahlung wird zum Lot hin gebrochen (transmittierter Teil), ein anderer reflektiert. Dabei gilt das Reflexionsgesetz: Der Einfallswinkel ist gleich dem Reflexionswinkel. Unter geeigneten Bedingungen kann jedoch die einfallende Strahlung vollständig reflektiert werden, siehe Totalreflexion.

Die Reflexion von elektromagnetischer Strahlung an einer Grenzfläche erfolgt in der Regel nur teilweise, der andere Teil wird transmittiert. Der Reflexionsgrad ist definiert als das Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtintensität



Einfluss der komplexen Brechzahl ($n_1 + ik_0$) eines Materials auf das Reflexionsverhalten einer elektromagnetischen Welle beim Auftreffen auf die Grenzfläche zweier Materialien (beispielsweise bei Luft/Glas) in Abhängigkeit vom Einfallswinkel



$$R = \frac{I_{\text{refl}}}{I_{\text{einf}}}$$

Der Reflexionsgrad kann über den Reflexionsfaktor aus den fresnelschen Formeln berechnet werden. Er ist vom Einfallswinkel und Polarisation des Lichts sowie von den Eigenschaften der beteiligten Materialien abhängig (Verhältnis der Brechzahlen und des Extinktionskoeffizienten).

Die Brechzahl ist wellenlängenabhängig, das heißt, Wellen unterschiedlicher Wellenlänge können vollkommen anders reflektiert werden. Beispielsweise besitzen Metalle aufgrund der Absorption durch das Elektronengas einen hohen Extinktionskoeffizienten für elektromagnetische Strahlung im Infrarot-Bereich, sie sind damit undurchsichtig und weisen einen sehr hohen Reflexionsgrad von im Allgemeinen mehr als 90 Prozent auf. Hingegen sinkt der Reflexionsgrad von Metallen im sichtbaren oder ultravioletten Bereich mitunter innerhalb eines kleinen Frequenzbereichs sehr schnell (siehe Bild mit dem Beispiel Silber). In der Reflexionsspektroskopie schließt man vom gemessenen Reflexionsspektrum auf im Material wirksame Mechanismen und deren Parameter (Bandübergänge, Elektronendichten im Leitungsband, Polarisierbarkeiten usw.), siehe Brechzahl#Permittivitätszahl und Elektrische Suszeptibilität#Herkunft aus addierten Beiträgen verschiedener Mechanismen.

Durch den unterschiedlichen Reflexionsgrad in Abhängigkeit der Polarisation des Lichts ändert sich diese bei jeder Reflexion. Das heißt, fällt unpolarisiertes Licht auf eine Grenzfläche, so ist das reflektierte und das gebrochene Licht (bei $\alpha \neq 0^\circ$ und $\alpha \neq 90^\circ$) teilweise polarisiert. In dem Sonderfall $\alpha + \gamma = 90^\circ$ wird der parallel zur Einfallsebene polarisierte Lichtanteil überhaupt nicht reflektiert, sondern vollständig gebrochen (Brewster-Winkel). Der reflektierte Anteil ist danach vollständig senkrecht polarisiert und der transmittierte enthält beide Polarisationsrichtungen. Dieser Effekt ermöglicht es zum Beispiel, Laserlicht ohne Reflexionsverlust durch ein Fenster hindurchtreten zu lassen.

Weiteren Einfluss auf die Reflexion hat die von der Kristallorientierung abhängige Brechzahl von doppelbrechenden Materialien. Hier unterscheidet sich der Reflexionsgrad zusätzlich noch von der Kristallorientierung der Kristalloberfläche. Auch ein Magnetfeld kann die Reflexion beeinflussen, was technisch bei magnetooptischen Speichermedien ausgenutzt wird.

Eine Verringerung der Gesamtreflexion durch mehrere abgestimmte Schichten ist möglich, siehe Antireflexionsschicht.

Reflexion bei elektrischen Leitungen

Wenn eine elektrische Leitung mit ihrem Wellenwiderstand abgeschlossen ist, wird dort eine über die Leitung einfallende Welle vollständig, ohne Reflexion, absorbiert. Der 'Abschluss' kann ein Lastwiderstand sein (Abschlusswiderstand), ein Eingangswiderstand einer analogen oder digitalen Schaltung oder auch eine oder mehrere weitere Leitungen, siehe Ersatzlast). Bei Fehlanpassung kommt es – Linearität vorausgesetzt – zu einer reflektierten Welle gleicher Frequenz, deren Amplitude im Verhältnis zu jener der einfallenden Welle als Reflexionsfaktor r bezeichnet wird:

$$r = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Darin sind Z_L die Impedanz des Abschlusses und Z_0 der Wellenwiderstand der Leitung. Bei einem nichtlinearen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung entstehen Oberwellen.

Im Allgemeinen ist r frequenzabhängig und komplex, typischerweise mit Betrag kleiner als 1; sein Argument bedeutet eine Phasenänderung. Bei Lastimpedanzen mit negativem Realteil kann der Betrag auch größer als 1 werden, d. h. die reflektierte Welle hat eine größere Amplitude als die einfallende. Die fehlende Energie muss der negative Widerstand liefern.

Spezialfälle:

- $r = 0$ bedeutet, dass die Welle gar nicht reflektiert wird, dann gibt es auch kein Echo. (Fall: angepasste Leitung).
- $r = 1$ bedeutet, dass die Welle 100 % reflektiert wird (Fall: offenes Ende = Spannungsverdopplung durch Überlagerung der vorlaufenden und reflektierten Welle).
- $r = -1$ bedeutet, dass die Welle 100 % reflektiert, aber invertiert wird (Fall: Kurzschluss; Spannung = 0 am Leitungsende durch Überlagerung der vorlaufenden und reflektierten Welle).

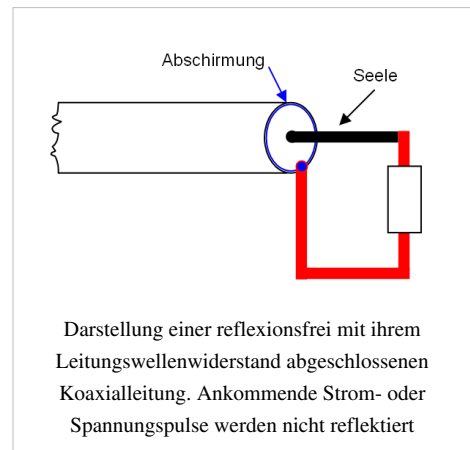
Die experimentelle Überprüfung wird in Zeitbereichsreflektometrie beschrieben. Die auf der Leitung laufenden vorlaufenden und reflektierten Wellen können sich überlagern und zu einer ortsabhängigen Verteilung von Strom und Spannung führen (siehe auch: Stehende Welle, Stehwellenmessgerät).

Anwendung

Eine Standardanwendung der Spektroskopie ist die Messung des Reflexionsspektrums eines Materials.

Dass die Reflexion zu einer Polarisation von Licht führt, macht man sich in der Fotografie zunutze, um störende Reflexionen an Scheiben oder Wasserflächen zu reduzieren. Dazu werden Polarisationsfilter eingesetzt. Je nach Orientierung des Filters wird das reflektierte Licht stärker oder schwächer ausgefiltert als das unpolarisierte Licht. Die Reflexe werden im Bild also entweder abgeschwächt oder verstärkt.

Bei Antennen wird die Sendeleistung durch Spiegel gebündelt und eine Richtwirkung erreicht, zum Beispiel bei Parabolspiegeln für Satellitenantennen.



Reflexion in der Akustik

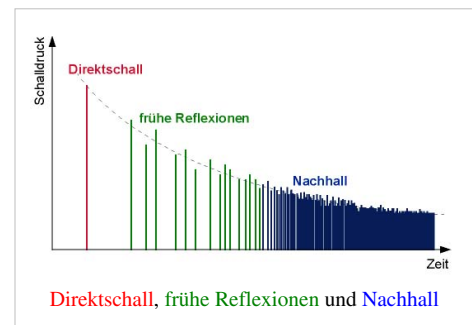
Typen von Reflexionen

In der Akustik ist die Schallreflexion gemeint, also der Rückwurf von Schall. Ebene, schallharte, nicht absorbierende Oberflächen reflektieren gut die Schallwellen. Beim Erkennen dieser Schallreflexionen spielt die Echowahrnehmungsschwelle eine bedeutende Rolle. Je nach Anordnung und Anzahl der reflektierenden Flächen und Art der Beschallung ergibt sich ein unterschiedlicher Höreindruck:

- Echos (Felswand in größerem Abstand)
- Flatterecho (zwei parallele reflektierende Wände)
- Nachhall (große Räume mit harten Wänden, wie in Kirchen)
- hohe Räumlichkeit (akustisches Raumempfinden in Konzertsälen)
- trockener Klang (in Räumen mit wenig reflektierenden Flächen)

Für den akustischen Eindruck wichtig sind:

- Anteil des Direktschalls am Gesamtschallpegel
- Zeitverzögerung und Richtung von frühen Reflexionen, sowie deren Anteil am Gesamtschallpegel
- Einsatzverzögerung und räumliche Verteilung des Nachhalls, sowie dessen Anteil am Gesamtschallpegel und dessen zeitlicher Verlauf (Nachhallzeit)



Raumakustisches Design

Bei Räumen sind je nach Nutzung andere raumakustische Eigenschaften und damit jeweils ein anderes Reflexionsverhalten der Wände sinnvoll:

- Bis zu einer gewissen Grenze reflexionsarme Räume bei Tonstudios (also keine schalltoten Räume), damit der akustische Charakter des Aufnahmerraums möglichst geringen Einfluss auf die Aufnahme bekommt.
- Räume mit mäßig reflektierenden Wänden für Unterrichtsräume. Einerseits soll die Stimme des Lehrers durch frühe Reflexionen bis 15 ms unterstützt werden, andererseits darf die Sprachverständlichkeit aber nicht durch zu starke späte Reflexionen und zu hohe Nachhallzeit vermindert werden. Die günstige Nachhallzeit für Normalhörende nach DIN 18041 „Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen“ liegt abhängig vom Raumvolumen zwischen 0,3 und 0,8 Sekunden. In Klassenzimmer mit einem Volumen von 125 bis 250 m³ ist eine Nachhallzeit von 0,4 bis 0,6 Sekunden optimal. Für Hörbehinderte sollten Nachhallzeiten um 0,3 Sekunden angestrebt werden.
- Räume mit stark reflektierenden Wänden und einem ausgewogenen Verhältnis von Direktschall, frühen Reflexionen und Nachhall für Konzertsäle. Hier ist es das Ziel, durch frühe Wandreflexionen die seitlich auf die Ohren einfallen ein möglichst „räumliches“ Musikerlebnis zu erzielen. Auch eine hohe Diffusität, also Streuung des Schalls ist wichtig. Günstige Nachhallzeit liegt bei 1,5 bis 2 Sekunden.

Eine ganz besondere Bedeutung bei der räumlichen Raumerkennung hat die Anfangszeitlücke (ITDG).

Zusammenhang Reflexion, Absorption, Transmission

Folgende Größen spielen bei Schallreflexionen eine Rolle:

- Der Schallreflexionsgrad ρ oder R ist ein Maß für die reflektierte Schallintensität.
- Der Schallabsorptionsgrad α oder A ist ein Maß für die absorbierte Schallintensität.
- Der Schalltransmissionsgrad τ oder T ist ein Maß für die durchgelassene Schallintensität.
- Der Schalldissipationsgrad δ oder D ist ein Maß für die "verlorengegangene" Schallintensität.

Bei Auftreffen auf Begrenzungsflächen wird die eintreffende Schallintensität entweder an der Begrenzungsfläche reflektiert oder von der Begrenzungsfläche absorbiert. Es gilt somit

$$\rho + \alpha = 1.$$

Der absorbierte Anteil der Schallintensität wird hierbei entweder von der Begrenzungsfläche durchgelassen (transmittiert) oder in den Materialien der Begrenzungsfläche in Wärme umgewandelt (dissipiert). Es gilt somit

$$\alpha = \tau + \delta.$$

Somit gilt insgesamt

$$\rho + \tau + \delta = 1.$$

In der Akustik gehören folgende Wörter zur gestörten Schallausbreitung:

- Schallabsorption
- Schallreflexion
- Schalltransmission
- Schalldissipation.

Reflexion von Wasserwellen

Wellenreflexion bedeutet bei fortschreitenden Wasserwellen das *Zurückwerfen* eines Teils ihrer Energie an einem Bauwerk (Wellenbrecher, Uferböschung) oder an Orten, wo sich die Konfiguration des natürlichen Meeresgrundes (stark) ändert. Zugleich wird ein anderer Anteil der Wellenenergie fortgeleitet und der restliche Anteil durch die Prozesse des Wellenbrechens, der Flüssigkeits- und Bodenreibung dissipiert und absorbiert, vergleiche dazu Wellentransformation, Wellenabsorption.

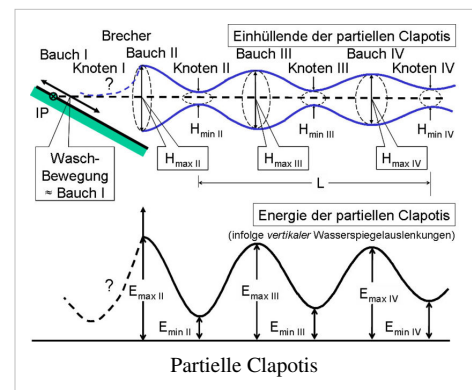
Dementsprechend lautet das Gesetz von der Erhaltung der Energie:

$$E_i = E_t + E_r + E_a$$

Darin bedeuten

- E_i = Energie der anlaufenden Wellen
- E_t = Energie der (durch das Bauwerk) fortgeleiteten (transmittierten) Wellen
- E_r = Energie der am Bauwerk reflektierten Wellen
- E_a = Energieverlust infolge der Wellenabsorption.

Werden die genannten Energieanteile E_t , E_r , E_a jeweils in das Verhältnis zur Energie der anlaufenden Wellen E_i gesetzt, können solche Werte als Transmissionskoeffizient, Reflexionskoeffizient und Absorptionskoeffizient angegeben werden. Im Allgemeinen ist der Reflexionskoeffizient $C_r = E_r/E_i < 1$. Nur im theoretischen Fall der perfekten Reflexion (bei Vorliegen einer Clapotis) ist $C_r = E_r/E_i = 1$. Da die Wellenenergie dem Wellenhöhenquadrat proportional ist, kann der Reflexionskoeffizient auch einfacher als Quotient der Höhe der reflektierten Welle H_r und der Höhe der anlaufenden Welle H_i geschrieben werden $C_r = H_r/H_i$.



Siehe auch

- Dissipation (Physik)
- Absorptionsgrad
- Transmissionsgrad
- Dissipationsgrad
- Dissipative Struktur
- Emission (Physik)

Weblinks

Optik

- *Strahlenoptik und Reflexion Erklärung der Reflexion von Lichtstrahlen am ebenen Spiegel, Hohlspiegel und Wölbspiegel* ^[2]. Patrick Wagner, abgerufen am 14. Oktober 2007.
- *Animation zur Streuung – Reflexion an Oberflächen* ^[3]. Dieter Welz, abgerufen am 14. Oktober 2007.
- *Reflexion und Brechung von Licht – Animationen* ^[4]. Michael Komma, abgerufen am 14. Oktober 2007.

Akustik

- Frühe Reflexionen unter 15 ms sind bei Stereo-Aufnahmen unerwünscht ^[5] (PDF-Datei; 36 kB)
- H. Redlich und M. Fouqué: Über die Rauminformation in der Stereophonie - Anwendungsbeispiel für Reflexionen ^[6] (PDF-Datei; 384 kB)
- Bedeutung der Reflexion in der Raumakustik ^[7]
- Bedeutung der diffusen Reflexion (Streuung) in der Raumakustik ^[8]

Einzelnachweise

- [1] Eugene Hecht: *Optik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005, ISBN 3486273590, S. 168ff.
- [2] <http://www.scandig.info/Strahlenoptik.html>
- [3] <http://www.zum.de/dwu/depotan/apop002.htm>
- [4] <http://www.mikomma.de/optik/reflrefrac/reflfrac.htm>
- [5] <http://www.sengpielaudio.com/FruheReflexionenUnter15.pdf>
- [6] <http://www.sengpielaudio.com/Fouque-Rauminformation.pdf>
- [7] <http://www.fairaudio.de/hifi-lexikon-begriffe/reflexion-raumakustik.html>
- [8] <http://www.fairaudio.de/hifi-lexikon-begriffe/diffuse-streuung.html>
-

Regenbogen

Ein **Regenbogen** ist ein atmosphärisch-optisches Phänomen, das als kreisbogenförmiges Lichtband mit radialem und für Spektralfarben charakteristischem Farbverlauf wahrgenommen wird. Er entsteht durch Spiegelung und wellenlängenabhängige Brechung des Sonnenlichts in den annähernd kugelförmigen Wassertropfen einer Regenwand oder -wolke. Der Beobachter hat die Regenwand vor und die Sonne hinter sich. Über dem kräftigen *Hauptregenbogen* ist gelegentlich ein schwächerer *Nebenregenbogen* mit umgekehrter Farbfolge zu sehen. Jeder Regenbogen ist auf seiner blauen Seite von schmalen Lichtstreifen begleitet (*Interferenz-Regenbögen*), die man manchmal an der inneren Seite des *Hauptregenbogens* erkennen kann. Der Regenbogen zählt zu den sogenannten Photometeoren.

Optik des Regenbogens



Ein Doppelregenbogen in Alaska



Regenbogen über Melbourne

Charakter des Sonnenlichts und Zusammenfassung der Regenbogenentstehung

Das Lichtspektrum des Sonnenlichts ist ein winziger Teil des elektromagnetischen Spektrums und besteht aus elektromagnetischer Strahlung unterschiedlicher Wellenlänge. Bei hochstehender Sonne ist die natürliche Mischung der Strahlung am besten sichtbar, die dann als weißliches Tageslicht wahrgenommen wird. Bei tiefstehender Sonne ist die Mischfarbe rötlicher, da der kurzwellige blaue Anteil der Sonnenstrahlen in der Atmosphäre einer stärkeren Streuung unterliegt und Effekte wie das Morgenrot bedingt.

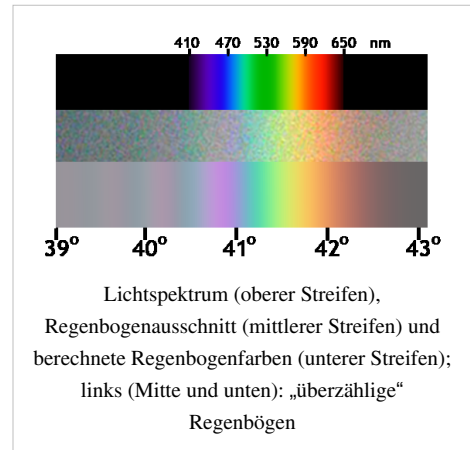
Die Ursache für die Entstehung der Farben und Buntheit des Regenbogens ist die Dispersion in einem Wassertropfen, also dessen



Farbzerlegung des Sonnenlichts durch ein Prisma
(qualitativ)

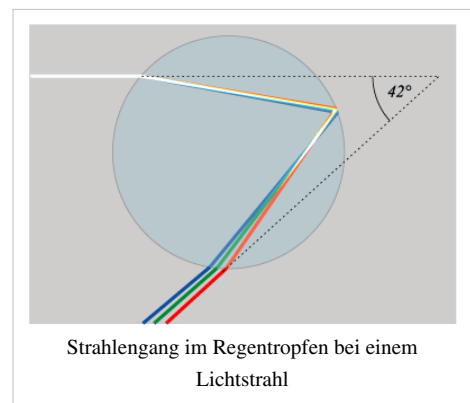
Fähigkeit weißes Licht wie ein Prisma (siehe rechts) wellenlängenabhängig unterschiedlich stark zu brechen. Im Regenbogen sind aber die Farben weniger rein und deutlich voneinander getrennt als im Lichtspektrum, das zum Beispiel mit Hilfe eines Prismenspektroskops beobachtbar ist. Ursache ist die Interferenz und teilweise Mischung der Lichtwellen innerhalb des Regenbogens.^[1]

Wenn während oder kurz nach einem Regenereignis Sonnenlicht auf eine Wand von Regentropfen fällt, wird das Licht in ihnen gebrochen und reflektiert. Da jeder Lichtstrahl auf eine andere Stelle des runden Regentropfens fällt, wird das parallele Sonnenlicht in einem Kegel zurückgeworfen, und zwar mit einem bevorzugten Winkel von rund 41° , bedingt durch eine Kombination aus Brechung beim Eintritt in den Regentropfen und der Reflexion an dessen Rückwand. Da Sonnenlicht, wie oben dargelegt, unterschiedliche Wellenlängen besitzt, die im Regentropfen auch unterschiedlich stark gebrochen werden, ergibt sich für diese jeweils auch unterschiedliche maximale Grenzwinkel, die etwas von den 41° abweichen. Das rote Licht weist einen maximalen Winkel von etwa 42° auf, das blaue Licht eher von 40° . Blickt der Beobachter nun zur Regenwand, so erscheinen ihm all jene Tropfen farbig, welche das Sonnenlicht im besagten Winkel genau auf sein Auge lenken. Der Regenbogen wird also nur sichtbar, wenn der Betrachter mit dem Rücken zur Sonne auf die Regenwand blickt, denn nur dann kann er in Richtung dieses Winkels schauen. Die Breite des Regenbogens entsteht durch die wellenlängenabhängige Auffächerung des Lichts, die kreisrunde Form des Regenbogens aber durch den konstanten Blickwinkel bezüglich der optischen Achse des Auges zum parallel einfallenden Sonnenlicht. Auch oberhalb der roten Farbe (im Infrarot) und unterhalb der blauen Farbe (im Ultraviolett) des Regenbogens sind „Farben“, die das menschliche Auge jedoch nicht wahrnehmen kann. Da der Ablenkwinkel von der Wellenlänge abhängig ist, besitzen die verschiedenfarbigen Bögen auch unterschiedliche Kreisdurchmesser.

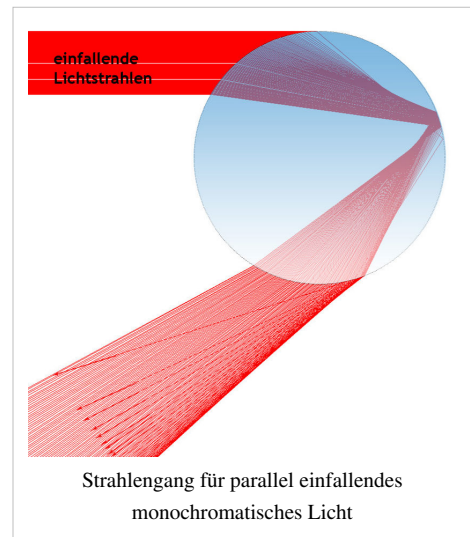


Reflexionscharakteristik, Brechung und Dispersion am Wassertropfen

Wassertropfen sind in guter Näherung transparente kleine Kugeln. Die Abbildung rechts verdeutlicht, was mit einem Lichtstrahl geschieht, wenn er auf diese Tropfen trifft. Bei Ein- und Austritt wird ein Teil des Strahls gemäß dem Brechungsgesetz abgelenkt und an der rückwärtigen inneren Oberfläche teilweise reflektiert. Der andere Teil der Strahlen wird direkt an der Ein- und Austrittsfläche reflektiert, sie reduzieren die Intensität des Regenbogens, haben aber keinen weiteren Einfluss auf die Entstehung des Regenbogens und sind deswegen im Bild nicht eingezeichnet. Einfallende Strahlen in der unteren Hälfte des Tropfens (hier nicht gezeigt) werden entsprechend dem oberen Lichtstrahl spiegelbildlich reflektiert und gebrochen, und der Austritt der Strahlen erfolgt somit spiegelbildlich nach oben. Ein sich hoch oben (zum Beispiel in einem Flugzeug) befindender Beobachter kann so auch den unteren, normalerweise fehlenden Teil des Regenbogens sehen.



Wesentlich ist, dass die Tropfenoberfläche gekrümmt ist, denn dadurch werden die einzelnen Lichtstrahlen in Abhängigkeit von ihrem Auftreffpunkt auf den Tropfen unterschiedlich stark gebrochen, was in der Abbildung rechts unten dargestellt ist. Die geometrische Darstellung der verschiedenen einfallenden Strahlengänge zeigt, dass die austretenden Strahlen von dem kugeligen Wassertropfen unabhängig vom Tropfendurchmesser maximal unter einem bestimmten Grenzwinkel von annähernd 42 Grad zurückgeworfen werden. Da größere Ablenkwinkel bei der hier gezeigten einfachen Reflexion nicht auftreten, häuft sich dort der Anteil verschiedener Auftreffpunkte, und die Intensität des reflektierten Lichtes ist deshalb unter dem Grenzwinkel besonders hoch. Dieser ist abhängig von der Wellenlänge des einfallenden Lichts und wird als *Regenbogenwinkel* bezeichnet. Da fallende Wassertropfen annähernd kugelförmig sind, tritt der Grenzwinkel rotationssymmetrisch um die Richtung des parallel einfallenden Sonnenlichts auf. Es ergibt sich dadurch eine kegelförmige Abstrahlung vom Regentropfen (Kegelspitze etwa an der Rückseite des Tropfens).

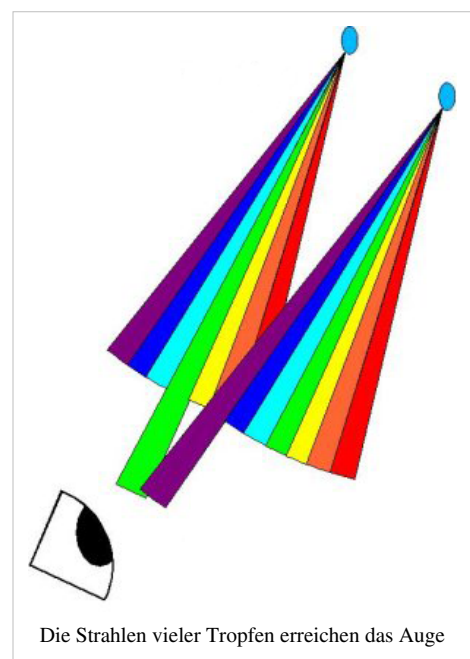


Der Grenzwinkel ist wegen der bereits oben erwähnten Dispersion von der Wellenlänge des auftreffenden Lichtes abhängig, jede Wellenlänge und somit Farbe hat ihren eigenen Grenzwinkel: etwa 42° bei Rot bis etwa 40° bei Blau. Es kommt zu einer wellenlängenabhängigen Auffächerung des Sonnenlichts im Wassertropfen. Ohne diese Auffächerung würde um den dann wellenlängenunabhängigen Grenzwinkel herum ein schmalere und farblosere Lichtbogen entstehen.

Durch die Kugelform des Regentropfens kommen zusätzliche schwache, sogenannte Interferenzbögen zustande, die die dominierenden Regenbögen auf der blauen Seite begleiten. Es gibt zwei verschiedene geometrisch-optische Strahlengänge (siehe Bild rechts unten), die unter dem gleichen Beobachtungswinkel zurückgeworfen werden und sich somit überlagern. Mit abnehmendem Winkelabstand zum Sonnengegenpunkt wird der Wegunterschied zwischen den beiden Strahlen immer größer, und es kommt zusätzlich abwechselnd zur gegenseitigen Verstärkung oder Abschwächung der Farben, auch Interferenz genannt.

Das von einem Regenbogen reflektierte Licht hat einen sehr hohen Polarisationsgrad. Mit Hilfe eines Polarisationsfilters kann ein Regenbogen, je nach Drehwinkel des Filters vor dem Beobachteraue oder der Kamera, entweder weitgehend gelöscht, oder im Kontrast gesteigert werden.

Der Widerspruch, dass laut der Skizze „Strahlengang im Regentropfen“ eigentlich Blau die oberste Farbe im Hauptbogen sein müsste, ist nur scheinbar – da Blau unter einem kleineren Winkel reflektiert wird, sind die Tropfen, die für einen Beobachter das *Blau* liefern, dem Zentrum des Regenbogens somit näher (siehe Bild rechts).



Hauptregenbogen

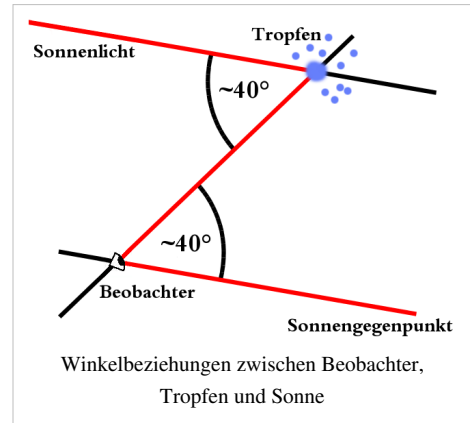
Der sogenannte Hauptregenbogen entsteht aus der im vorigen Kapitel beschriebenen einfachen Reflexion und Brechung der Sonnenstrahlen in den Regentropfen. Die Strahlen treffen in breiter Front auf die Vielzahl kleiner, im Blickfeld vor dem Beobachter annähernd gleichmäßig verteilter Wassertropfen. Fehlen die Wassertropfen dabei an einer Stelle, zeigt sich dort auch kein Regenbogen. In den meisten Fällen nimmt man daher nur einen Abschnitt des vollen Bogens wahr.

Die genaue Position des Hauptregenbogens kann man sich nun über eine verlängerte Linie herleiten, die man sich zwischen dem Kopf des Beobachters und dessen von der Sonne geworfenen Schatten vorstellen muss. Diese Linie ist identisch zur verlängerten Verbindung zwischen Beobachter und Sonne und zeigt in Richtung des Sonnengegenpunktes. Dieser bildet das Zentrum des Regenbogens. Da der Winkel zwischen dieser Linie und dem Regentropfen ein Z-Winkel des Winkels zwischen dem ursprünglichen Sonnenstrahl und dem Austrittsstrahl des Regentropfens ist, sind beide identisch und somit gleich 40 bis 42 Grad. Folglich blickt der Beobachter genau dann in das vom Tropfen im Maximalwinkel abgestrahlte Licht, wenn er den Schatten seines Kopfes fixiert und dann um 40 bis 42 Grad – den so genannten halben Öffnungswinkel – in Richtung des Regentropfens nach oben blickt. Hier erscheint für ihn dann, solange er die Sonne genau im Rücken hat, der Scheitelpunkt des Hauptregenbogens. Dieser stellt den eigentlichen Regenbogen dar und tritt am deutlichsten hervor. Er erstreckt sich dabei halbkreisförmig um den Sonnengegenpunkt.

Steht die Sonne genau am Horizont, so gilt dies auch für das Zentrum des Regenbogens, wodurch dieser bei ausreichender Tropfenzahl einen vollständigen Halbkreis einnimmt. Dieser beträgt für den Hauptregenbogen dann eine maximale Höhe von 42 Grad und einer maximalen Breite von 84 Grad, also das doppelte des Regenbogenwinkels. Er ist umso niedriger und flacher, je höher die Sonne steht und je tiefer der Sonnengegenpunkt unterhalb des Horizonts absinkt. Die Winkel zwischen den Sonnenstrahlen und den vom Beobachter wahrgenommenen farbigen Strahlen bleiben dabei immer unverändert. Falls die Sonne höher als 42° steht, rutscht auch der Scheitelpunkt des Bogens unter den Horizont und wäre nur unterhalb der Position des Beobachters sichtbar, zum Beispiel von der Spitze eines Berges oder Turmes (siehe Bild rechts).

Um einen zum Kreis geschlossenen Hauptregenbogen sehen zu können, muss das Reflexionsmedium Wassertropfen in voller radialer Ausdehnung um den Sonnengegenpunkt vorhanden sein und von der Sonne beschienen werden. Diese Möglichkeit besteht im Allgemeinen nur von einem Flugzeug oder einem Ballon aus. Bei geeigneten Witterungsbedingungen kann man in der Tat vor allem während der Start- oder Landephase, d.h. in Bodennähe, einen vollständigen Regenbogenkreis beobachten.

Die oben beschriebene Dispersion im Regenbogen bewirkt eine Auffächerung des Hauptbogens von etwa 1,8° zwischen Rot und Blau. Bedingt durch eine räumliche Ausdehnung der Sonne am Himmel von ungefähr 0,5° beträgt die Breite jeder Farbe im Hauptbogen etwa 0,5°. Diese Unschärfe liegt deutlich unter der Aufspaltung durch Dispersion, weswegen der Beobachter noch eine relativ reine rote äußere Farbe sieht, während die anderen Farben durch Mischung eine geringere Sättigung und Reine aufweisen. Kombiniert man die Einflüsse der endlichen Sonnenausdehnung und der Dispersion, beträgt die Gesamtbreite des Hauptregenbogens ungefähr 2,2°. Wäre ein Regenschauer etwa 1 km entfernt, entspräche das somit einer Strecke von ungefähr 35 m.

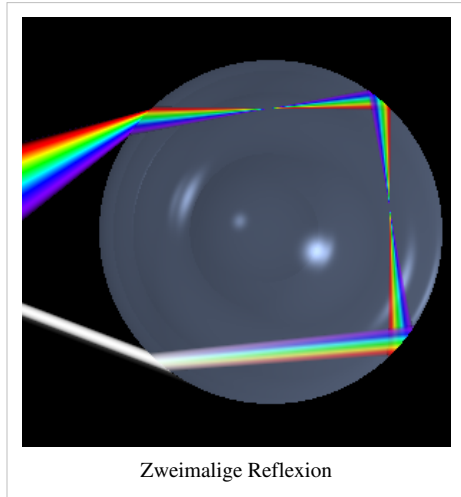


Steht die Sonne höher als 42°, ist der Hauptregenbogen nur von einem erhöhten Standort aus sichtbar und steht unterhalb des Horizonts. Hier ein Regenbogen am Altenbergturm nach Schauerdurchzug

Nebenregenbogen

Bisher wurden Strahlen betrachtet, die genau einmal im Inneren der Tröpfchen reflektiert werden. Der direkt oberhalb des Hauptbogens gelegene Nebenregenbogen dagegen wird von zweifach reflektierten Strahlen gebildet; weitere Nebenbögen werden entsprechend mehrfach reflektiert. Nebenbögen sind deutlich lichtschwächer als der Hauptregenbogen, da bei jeder Reflexion ein Teil des Sonnenlichtes unreflektiert den Regentropfen verlässt. Außerdem wird der Lichtstrahl aufgrund des kleineren Ein- und Ausfallwinkels am Tropfen etwas stärker wellenabhängig gebrochen und somit aufgefächert, was ebenso zu einer weiteren Abschwächung führt. Nebenregenbögen können daher nur bei sehr guten Lichtverhältnissen oberhalb und unterhalb des Hauptregenbogens beobachtet werden.

Der Nebenbogen mit zweifacher Reflexion im Tropfen besitzt einen Winkel von circa 50 Grad für rotes und 53 Grad für blaues Licht. Entgegen der einfachen Reflexion am Hauptregenbogen, dessen obere Hälfte von den einfallenden Strahlen an der oberen Hälfte des Tropfens gebildet werden, sind es beim Nebenregenbogen mit zweifacher Reflexion Lichtstrahlen, die am unteren Teil des Tropfens eintreten. Mit jeder zusätzlichen Reflexion innerhalb des Bogens kehrt sich außerdem der Farbverlauf ein weiteres Mal um. Die nebenstehende Grafik veranschaulicht den Strahlverlauf für den Nebenbogen mit zweimaliger Reflexion in der Nähe der maximalen Ablenkung. Weitere Nebenregenbögen höherer Ordnung, also mit mehr als zwei Reflexionen innerhalb des Tropfens, sind wegen der oben beschriebenen zusätzlichen Abschwächung extrem selten zu beobachten und wurden erstmals von Félix Billet (1808-1882) beschrieben, der auch die zugehörigen Winkelabstände vom Sonnengegenpunkt dafür berechnete^[2]



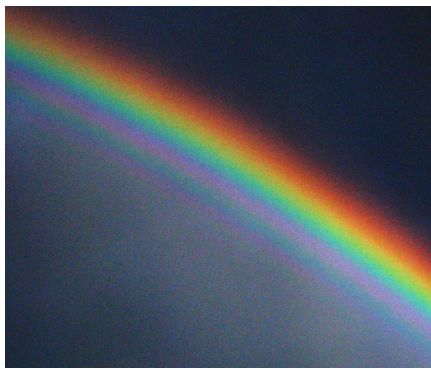
Zweimalige Reflexion



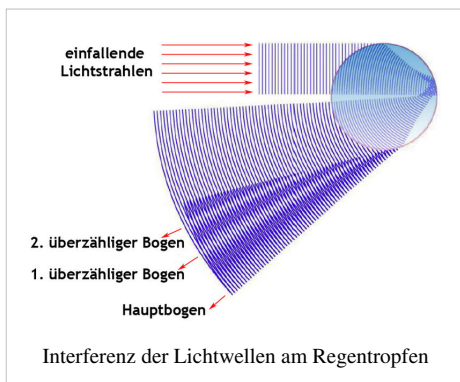
Haupt- (links) und Nebenregenbogen (rechts).
Der Himmel im Inneren des Hauptregenbogens
erscheint stets heller als außerhalb davon.

Im oberen Bild mit einem Haupt- und Nebenregenbogen fällt auf, dass der Himmel im Innern des Hauptbogens deutlich heller als außerhalb erscheint und insbesondere der Bereich zwischen Haupt- und Nebenregenbogen deutlich dunkler als seine Umgebung ist. Dieser Helligkeitskontrast entsteht, weil bei Winkeln unterhalb des Maximalwinkels beim Hauptregenbogen sich die Farben überlagern und so ein weißes Licht erzeugen. Da beim Nebenregenbogen der Farbverlauf umgekehrt ist, zeigt sich das etwas hellere weiße Licht bei Winkeln oberhalb des Maximalwinkels des Nebenregenbogens. Dadurch entsteht zwischen diesen beiden Regenbogen ein dunkles Band, welches zu Ehren seines Entdeckers Alexander von Aphrodisias als *Alexanders dunkles Band* bezeichnet wird.

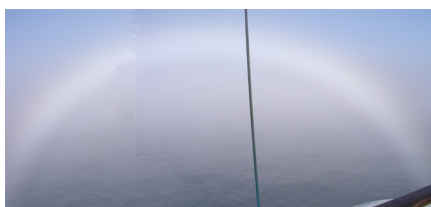
Sonderformen, Einfluss der Tröpfchengröße und Interferenzeffekte



Hauptspektrum gut zu erkennen und ein kleines Nebenspektrum darunter (Kontrast künstlich erhöht)



Interferenz der Lichtwellen am Regentropfen



Nebelbogen

Unter bestimmten Bedingungen sind innerhalb des Hauptbogens ein oder mehrere *zusätzliche* oder *überzählige* farbige Bögen erkennbar, siehe linkes Bild, die mit stetig abnehmendem Kontrast die Farbreihenfolge des Hauptbogens zu wiederholen scheinen. Diese zusätzlichen Farbbänder erklärte zuerst Thomas Young 1803 mit der Wellennatur des Lichts: Für Beobachtungswinkel kleiner als der Maximalwinkel gibt es für einen Strahl einer bestimmten Farbe verschiedene, unterschiedlich lange Strahlengänge durch den Tropfen, die sich im Auge des Betrachters überlagern. Beträgt der von der Tröpfchengröße abhängige Gangunterschied entlang dieser Wege die Hälfte der Wellenlänge, oder ein ungeradzahliges Vielfaches davon, so ist die Interferenz zwischen ihnen *destruktiv* und ihre Amplituden löschen sich gegenseitig aus. Dazwischen liegen jedoch Winkel, bei denen Gangunterschiede auftreten, die ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge entsprechen: Hier kommt es zur *konstruktiven Interferenz* und dadurch zu einem Nebenmaximum der Intensität (siehe Bild rechts).

Erst George Biddell Airy lieferte 1837 ein mathematisches Modell zur Darstellung der überzähligen Bögen. Im Gegensatz zur Young'schen Theorie hängt die von Airy berechnete Verteilung von der Tropfengröße ab, und ist auch nur bei einer bestimmten Tropfengröße besonders gut sichtbar. Die Abfolge der Regenbogenfarben wiederholen sich in den überzähligen Bögen nur scheinbar, durch die zusätzliche Überlagerung der Nebenmaxima der verschiedenen Farben mit unterschiedlicher Periodenlänge, sind in der Regel nur ein Teil der Farben des Hauptbogens sichtbar.^[3]

Die Reinheit der Farben kann sehr unterschiedlich ausfallen, auch sind häufig die Enden des Bogens besonders hell. Diese Effekte werden ebenfalls durch Interferenz verursacht, die sowohl von der Tröpfchengröße als auch von Abweichungen von der Kugelform abhängt. Generell lässt sich feststellen, dass große Tropfen mit

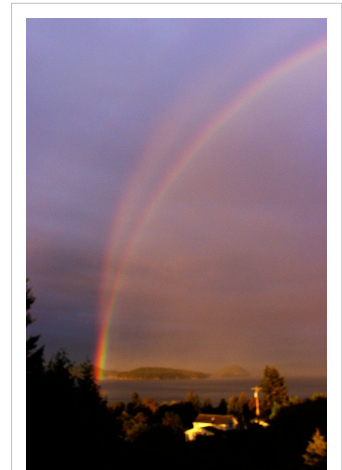
Durchmessern von mehreren Millimetern besonders helle Regenbögen mit wohldefinierten Farben erzeugen. Bei einer Tröpfchengröße unter 1,5 mm wird zunächst die Rotfärbung immer schwächer. Sehr kleine Tropfen, wie beispielsweise in Nebelschwaden, wo der Durchmesser oft nur etwa ein Hundertstel Millimeter beträgt, liefern nur noch verschmierte Farben.^[4] Bei Tröpfchengrößen unter 50 Mikrometern überlagern sich die Farben derart, dass der Regenbogen nur noch weiß erscheint. Diese spezielle Form wird als Nebelbogen bezeichnet.

Taubogen

Eine besondere Form eines Regenbogens bilden die Taubögen^[5], die seltener zu beobachten sind als ein gewöhnlicher Regenbogen.

Mondregenbogen

Mondregenbogen heißt ein Regenbogen bei Nacht, der das Mondlicht als Grundlage hat. Er ist wesentlich seltener als ein Regenbogen und erscheint dem Beobachter aufgrund seiner Lichtschwäche weiß. Zu sehen ist er, weil das menschliche Auge Helligkeitsunterschiede viel empfindlicher wahrnimmt als Farben (siehe Nachtsehen). Bei klarer Luft und ausgeprägtem Vollmond kann man aber auch Spektralfarben erkennen. Außerdem sieht man sie prinzipbedingt immer bei farbfotografischen Aufnahmen, wenn das Verfahren lichtempfindlich genug ist, so dass die Abbildung des Mondregenbogens gelingt.



Spiegelbogen oberhalb des Hauptbogens

Spiegelbogen

Besondere Erscheinungsformen bilden die sehr seltenen gespaltenen Regenbögen und Spiegelbögen (siehe Bild rechts unten). Wenn das Sonnenlicht an einer Wasserfläche gespiegelt wird, bevor es auf die Regentropfen trifft, kann ein zweiter Bogen entstehen, der am Horizont mit dem Hauptbogen zusammentrifft, weiter oben aber wie ein zweiter, den Hauptbogen kreuzender Bogen erscheint.^[6] ^[7] Darüber hinaus gibt es Beobachtungen von seitlich versetzten, sich überschneidenden Regenbögen, deren Entstehung bislang unklar ist.^[8]

Eisbogen

Der seltene Eisbogen^[9] entsteht in kalten Gegenden, wo er von Eiskristallen statt Wasser gebildet wird.

Scheinbare Entfernung des Regenbogens

Der Regenbogen wird von beiden Augen des Beobachters stets unter demselben Beobachtungswinkel (dem *Regenbogenwinkel*) gesehen. Vom stereoskopischen (räumlichen) Sehen wird er deshalb als ein Objekt in *unendlicher Entfernung* interpretiert. Diese Täuschung wirkt insbesondere dann irritierend, wenn sich „hinter“ einem „nahen“ Regenbogen (beispielsweise im Sprühnebel eines Gartenschlauches) noch Objekte im Gesichtsfeld befinden, deren Entfernung aufgrund des stereoskopischen Sehens als *kleiner als unendlich* eingeschätzt werden können. Ebenso irritierend wirkt die Tatsache, dass sich der Regenbogen mit dem Beobachter mitbewegt: man kann deshalb bekanntlich nie zum *Ende des Regenbogens* gelangen.

Vorkommen

Natürliche Regenbögen entstehen meist dann, wenn nach einem Regenschauer der Himmel schnell aufklart und die tiefstehende Sonne das abziehende Niederschlagsgebiet beleuchtet. In gemäßigten Klimazonen mit einer westlichen Vorzugswindrichtung wie in Mitteleuropa sind diese Bedingungen häufig am späten Nachmittag im Anschluss an ein Wärmegewitter erfüllt. Zu diesen kommt es meist bei Kaltfrontaufzügen, wobei am Vormittag im Mittel weniger Regen fällt als am Nachmittag, was auch die dann höhere Wahrscheinlichkeit bedingt auf einen Regenbogen zu treffen.

Im Sommer ist um die Mittagszeit herum kein Regenbogen zu beobachten, da die Sonne hierfür zu hoch steht. Im Winter besteht aber auch hier die Möglichkeit zumindest einen flachen Regenbogen anzutreffen. Unabhängig davon kann ein Regenbogen recht häufig in einem Sprühnebel beobachtet werden, vor allem bei Springbrunnen, Sprinklern und Wasserfällen. Da Regenbögen hier nicht auf ein Niederschlagsereignis angewiesen sind, kann man sie auch viel einfacher und regelmäßiger vorfinden. Bei entsprechendem Sonnenstand ist die Beobachtung von Regenbogen-Fragmenten auch in der Gischt von größeren Wellen möglich.

Bei gutem Wetter ohne bewölkten Himmel kann somit jeder selbst einen Regenbogen machen. Diese künstlich gemachten Regenbögen sind genau dieselben wie die natürlich vorkommenden, mit dem einzigen Unterschied der Größe auf der Reflexionsfläche. Um den Scheitelpunkt des Regenbogens zu finden, muss man dabei seinen Blick in Richtung des eigenen Schattens richten.



Regenbogen an einem Springbrunnen



Regenbogen-Fragment auf Wellenkamm

Abgrenzung zu anderen Phänomenen

Der optische Effekt der Dispersion des Sonnenlichts lässt sich auch bei anderen optischen Phänomenen beobachten, die jedoch nicht mit einem Regenbogen verwechselt werden sollten. Bekannt sind vor allem die Haloerscheinungen:

- Ein 22°-Halo bildet einen kreisrunden Kranz um die Sonne, ein Regenbogen jedoch meist nur einen Bogen mit der Sonne im Rücken.
- Nebensonnen als ein weiteres Halophänomen stehen waagerecht zum Beobachter neben der Sonne. Sie sind recht klein und haben keine Bogenform.
- Zirkumzenitalbögen bilden nur sehr kleine Ausschnitte und dies aus einem konkaven, also nach oben gewölbten Bogen.
- Zirkumhorizontalbögen entstehen, wenn die Sonne in einem Winkel von mindestens 57,8° über dem Horizont steht und sich in sehr hoch schwebenden sechseckigen Eiskristallen bricht.



Zirkumzenitalbogen am 10. Juli 2005

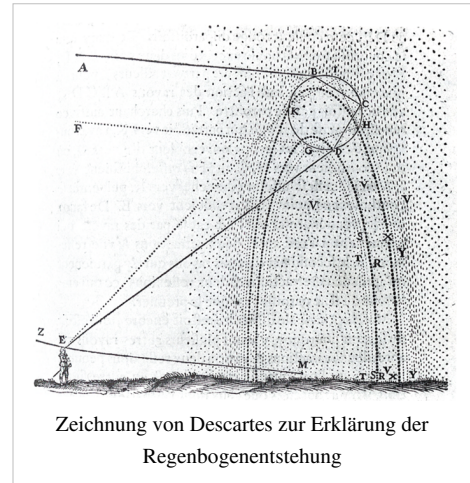
Der optische Effekt der Beugung des Sonnenlichts verursacht oft ähnlich dem Regenbogen farbige Lichtkränze und Farbverläufe in der Atmosphäre, ist aber von der Ursache des Regenbogens zu unterscheiden.

- Glorien treten meist nur auf, wenn man von oben auf eine Wolke blickt. Sie sind vergleichsweise klein und kreisförmig und sollten nicht mit einem viel größeren geschlossenen Regenbogen verwechselt werden.
- Irisierende Wolken besitzen zwar mitunter die Farbgebung eines Regenbogens, jedoch keinen Bogen.

Chronologie der physikalischen Erklärung

Der Regenbogen beflügelt nicht nur die Fantasie des Menschen, verschiedene Erklärungsversuche haben auch den Erkenntnisprozess in der Physik und dort speziell in der Optik wesentlich vorangetrieben.

Die oben angeführte physikalische Erklärung des Regenbogens, beruht in ihrem grundlegenden strahlenoptischen Teil auf 1637 veröffentlichte Arbeiten von René Descartes. Sie sind unter der Überschrift *DE L'ARC-EN-CIEL* im Anhang *Les Météores* seiner philosophischen Schrift *Discours de la méthode* beschrieben.^{[10] [11]} Er griff darin die bereits um 1300 von Dietrich von Freiberg in seinem Werk *De iride et de radialibus impressionibus* entwickelte Idee auf, wonach ein Regenbogen durch die Brechung und Reflexion von Sonnenstrahlen innerhalb einzelner Tröpfchen erklärt werden kann. Seine "mysteriöse" Erklärung der Regenbogenfarben war unzutreffend. Er wendete das kurz vorher von Willebrord Snell entdeckte Brechungsgesetz an, ohne die Dispersion (die wellenlängen-abhängige Brechung des Lichts) zu kennen.



Aus dem Jahre 1700 stammt eine den Regenbogen betreffende Arbeit von Edmond Halley,^[12] und 1704 brachte Isaac Newtons Theorie des Lichtes die Dispersion ins Spiel und machte so die Farbenpracht verständlich.^[13]

War es zu Newtons Zeiten noch Thema kontroverser Diskussionen, ob Licht nun korpuskularen oder wellenartigen Charakter besitze, so war auch hier der Regenbogen ein wichtiger Ideengeber. Das Rätsel der überzähligen Bögen veranlasste 1801 Thomas Young zur Durchführung seines berühmten Doppelspaltexperimentes. Er wies damit die Wellennatur des Lichtes nach und konnte im Gegenzug 1804 das Rätsel durch die Betrachtung von Interferenzerscheinungen lösen.^{[14] [15]}

Youngs Theorie wurde 1849 von George Biddell Airy weiter verfeinert. Er erklärte die Abhängigkeit des exakten Farbverlaufs von der Tröpfchengröße. Die eigens entwickelten mathematischen Verfahren spielen im Rahmen der WKB-Näherung noch heute eine wichtige Rolle für die moderne Quantenmechanik.^[13]

Moderne physikalische Beschreibungen des Regenbogens und ähnlich gearteter Probleme basieren im Wesentlichen auf der von Gustav Mie 1908 entwickelten und als Mie-Streuung nach ihm benannten Theorie.^[16]

Anwendung in der optischen Messtechnik

Der *Regenbogenwinkel* hängt – wie oben beschrieben – bei kugeligen Flüssigkeitströpfchen nicht von der Tropfengröße ab, sondern lediglich von der Brechzahl. Diese wiederum ist bei einer bestimmten Wellenlänge eine temperaturabhängige Materialkonstante der tropfenbildenden Flüssigkeit. Deshalb kann durch Messung des Regenbogenwinkels, unter dem monochromatische Laserstrahlung von einem Nebel reflektiert wird, die Temperaturverteilung innerhalb des Nebels berührungslos bestimmt werden, falls – wie in technischen Anlagen meist der Fall – bekannt ist, welche Flüssigkeit den Nebel bildet.

Kulturelle Bedeutung

Als ein nicht alltägliches und beeindruckendes Naturschauspiel haben Regenbögen ihre Spuren in der Kulturgeschichte der Menschheit hinterlassen und sind zudem ein in unzähligen Kunstwerken dargestelltes Bildmotiv. Da der Regenbogen weltweit bekannt und mit zahlreichen positiven Attributen versehen ist, hat er auch immer wieder Einzug in die Symbolik gehalten.

Rolle in Religion und Mythologie

Der Regenbogen ist von jeher ein wichtiges Element zahlreicher Mythologien und Religionen über alle Kulturen und Kontinente hinweg. Die Mythen sprechen ihm dabei oft die Rolle eines Mittlers oder einer Brücke zwischen Götter- und Menschenwelt zu. Mythologien ohne Regenbogen sind selten. Der Regenbogen als Mythos findet sich auch in den Erzählungen relativ isolierter Kulturen; daraus lässt sich schließen, dass dieser Mythos auf der Erde an verschiedenen Orten und zu verschiedenen Zeiten eigenständig erdacht und überliefert worden ist. Es geht nicht allein auf den Verkehr und den Austausch unter den großen Kulturen der Menschheit zurück, wenn der Regenbogen-Mythos heute überall auf der Erde aufgefunden werden kann.

Aborigines

Die australischen Ureinwohner, die Aborigines, verehren in ihrer Schöpfungsgeschichte eine Regenbogenschlange als den Schöpfer der Welt und aller Lebewesen. Die griechische Mythologie sah ihn als Verbindungsweg, auf dem die Göttin Iris zwischen Himmel und Erde reist. Nach der irischen Mythologie hat der Leprechaun seinen Goldschatz am Ende des Regenbogens vergraben. In der germanischen Mythologie war er die Brücke Bifröst, welche Midgard, die Welt der Menschen, und Asgard, den Sitz der Götter, miteinander verband. Während des Ragnarök, des Weltuntergangs der nordischen Mythologie, wird der Regenbogen zerstört. Regenbogen tauchen auch in der Schöpfungsgeschichte der Diné auf. Bei den Inka vertrat der Regenbogen die Erhabenheit der Sonne.

Babylonien

In der babylonischen Schöpfungsgeschichte Enuma Elisch („Als oben...“, im Folgenden Ee) wird davon erzählt, dass der Schöpfergott Marduk das Leben auf der Erde ermöglichte, indem er die Urflut, die Göttin Tiamat, tötete. Dieser Kampf geschah mit einem Bogen (Ee IV,35-40). Um das dauerhafte Bestehen der Schöpfung zu gewährleisten, nahm der höchste Gott, der Himmels Gott Anu, den Bogen Marduks und setzte ihn als „Bogenstern“ an den Himmel. Im babylonischen Mythos wird der Bogen vergöttlicht: Er darf in der Versammlung der Götter Platz nehmen und wird ewig erfolgreich sein (Ee VI,87-94). Der Bogen am Himmel ist in der altorientalischen Vorstellungswelt also ein kriegerisches Symbol für die göttliche Macht, Störungen auf der Erde zu bekämpfen und zu besiegen und so das Leben zu sichern. Assyrisches Rollsiegel: Eine Gottheit bekämpft mit dem Bogenstern eine dämonische Macht. (1. Jahrtausend v.d.Z.)

Judentum und Altes Testament

Im jüdischen Tanach (Altes Testament der christlichen Bibel), 1. Buch Mose 9, ist der Regenbogen ein Zeichen des Bundes, den Gott mit Noach und den Menschen schloss. Laut biblischer Erzählung versprach Gott nach dem Ende der Sintflut: „Ich will hinfort nicht mehr die Erde verfluchen um der Menschen willen, denn das Dichten und Trachten des menschlichen Herzens ist böse von Jugend auf.“ (Gen 8,21 [17]) Der Regenbogen als Zeichen des Friedens zwischen Mensch und Gott nimmt damit eine altorientalische Tradition auf, nach der das Phänomen als abgesenkter, also nicht schussbereiter Bogen Gottes interpretiert wurde. Aufgrund dieser Stelle ist der Regenbogen im Judentum bis heute ein wichtiges religiöses Symbol.



Joseph Anton Koch: Noahs Dankopfer (um 1803)

„Und wenn es kommt, dass ich Wetterwolken über die Erde führe, so soll man meinen Bogen sehen in den Wolken. Alsdann will ich gedenken an meinen Bund zwischen mir und euch und allem lebendigen Getier unter allem Fleisch, dass hinfort keine Sintflut mehr komme, die alles Fleisch verderbe.“

– Gen 9,14–15 [18]

Christentum und Neues Testament

Im Christentum wird ein anderer Traditionsstrang wichtig. In Ezechiel 1 sieht der Prophet einen gewaltigen Thronwagen. Oben auf dem Thron ist ein heller Schein „wie der Anblick des Bogens, der sich an einem Regentag in den Wolken zeigt. ... So etwa sah die Herrlichkeit Gottes aus.“ (Hes 1,28 [19])

Im griechisch verfassten Neuen Testament kommt der Regenbogen nur ein einziges Mal vor. In der Offenbarung des Johannes 10,1 [20] erscheint ein Engel mit einem Buch vom Himmel herab, er ist in eine Wolke gehüllt und über seinem Kopf ist ein Regenbogen. Dieses Bild basiert auf Ezechiel 1,28. Das griechische Wort für diese Erscheinung heißt „iris“, und hier wird deutlich, dass die antike Vorstellung des Kriegsbogens vergessen ist. Wichtig an der Erscheinung ist die schillernde Farbenpracht, die Himmel und Erde verbindet. Das griechische Wort bezeichnet neben dem Regenbogen auch ganz allgemein einen farbigen Ring (oder Halbring). In Offb 4,3 [21] steht in vielen deutschen Übersetzungen zwar Regenbogen, aber hier heißt es ausdrücklich, dass es sich um einen grünlich schimmernden Lichtkranz handelt – also einen Heiligenschein, der Gottes Gegenwart anzeigt. In der folgenden christlichen Tradition lebt das Symbol auf Ikonen und in der mittelalterlichen Malerei und Bildhauerei. Auf Altären und auf den Darstellungen des Jüngsten Gerichts über dem Eingangsportal einer Kirche wird Christus manchmal als der auf (oder in) einem Regenbogen sitzende Richter dargestellt werden – eine freie Aufnahme der Stellen in der Offenbarung vermischt mit Ezechiel. Der Regenbogen symbolisiert hier die Göttlichkeit Christi. Seit dem 12. Jahrhundert wird auch Maria in einem Regenbogen oder auf einem Regenbogen sitzend dargestellt und dadurch ihre Heiligkeit zum Ausdruck gebracht.

Regenbogen als Symbol

In Anlehnung an eine indianische Prophezeiung, derzufolge nach der Verwüstung der Erde *Krieger des Regenbogens* („Menschen vieler Farben, Klassen und Glaubensrichtungen“) die Welt bevölkern werden, erkor Greenpeace den Regenbogen zu seinem Erkennungszeichen und taufte sein Flaggschiff auf den Namen *Rainbow Warrior*.

Die Regenbogenfahne ist ein in der Geschichte wiederkehrendes Symbol, das meist Vielfalt zum Ausdruck brachte. Sie war die Flagge der alten südamerikanischen Hochkultur der Inkas. Während der Bauernkriege symbolisierte sie die Hoffnung auf Veränderung. Heutige Homosexuelle sehen die Regenbogenfahne mit 6 Farben als Zeichen für Toleranz und sexuelle Freiheit. In jüngerer Zeit, insbesondere seit den Demonstrationen gegen den Irak-Krieg 2003, führte die italienische Friedensbewegung eine Regenbogenfahne mit 7 Farben mit dem Aufdruck *Pace*, italienisch für *Frieden*, ein. Sie dient inzwischen der internationalen Friedensbewegung als Symbol.

Die offizielle Flagge des Jüdischen Autonomen Gebiets zeigt einen ebenfalls siebenfarbigen Regenbogen vor weißem Hintergrund.^[22] Die Farbreihenfolge ist gegenüber der italienischen Friedensfahne wiederum umgekehrt.

In der New Age Bewegung erschien der Regenbogen als Logo für die erste Buchreihe der Bewegung „New Age, Modelle für morgen“ und zierte seitdem zahlreiche esoterische Publikationen und Produkte. Hier hat der Regenbogen seine Symbolik jedoch verloren und dient lediglich zur Schaffung positiver Gefühle, Harmonie und Ganzheit.

Teile der Hamburger Grün-Alternativen Liste, die nach der Bielefelder Bundesdelegiertenkonferenz von Bündnis 90/Die Grünen Anfang 1999 aus der Partei ausgetreten waren, nannten sich in der Folgezeit Regenbogen – Für eine neue Linke. Ihre Abgeordneten im Landesparlament, der Bürgerschaft, wurden als *Regenbogenfraktion* bezeichnet.



Auch auf die Sprache hat der Regenbogen abgefärbt, wovon Begriffe wie Regenbogenpresse und Regenbogenforelle zeugen. Ein baden-württembergischer privater Radiosender nennt sich Radio Regenbogen. Auch der Name der Hilfsorganisation AIDA e.V. setzt sich aus den jeweiligen Anfangsbuchstaben aus dem portugiesischen *Arco Iris do Amor* (zu Deutsch: *Regenbogen der Liebe*) zusammen.

Regenbogen als Kunstmotiv

Der Regenbogen als Bildmotiv findet sich früher oder später bei nahezu allen Landschaftsmalern, stellt aber auch ein begehrtes Ziel vieler Naturfotografen dar. Zu nennen sind hier beispielsweise Caspar David Friedrich, Joseph Anton Koch oder Peter Paul Rubens. Dabei ist der Regenbogen auch ein beliebtes Laienmotiv und in künstlerischen Lehreinrichtungen aller Altersstufen zu finden.

Regenbogen in der Musik

Auch in der Musik finden sich viele Motive rund um den Regenbogen. So singt Judy Garland 1939 in *Das zauberhafte Land*, einer Verfilmung des Zauberers von Oz, von einem „Land irgendwo über dem Regenbogen“ (*Over the Rainbow*), in dem die „Träume wahr werden“. Dieses Lied wurde 1994 durch eine Coverversion von Marusha zu einer Techno-Hymne. In das gleiche Genre fiel auch *Rainbow To The Stars* von Dune.

Im Bereich des Metal ist der Hammerfall-Song *At The End Of The Rainbow* zu nennen, wo man am „Ende des Regenbogens mit Gold in den Händen“ stehen will.

Rainbow war eine Hardrockband, die 1975 vom Gitarristen Ritchie Blackmore gegründet wurde. Und die Deutsche Beatgruppe The Rainbows hatte in den 60er Jahren den Hit *My Baby Baby Balla Balla*.

Die Rolling Stones schilderten 1967 in ihrem Song „*She's A Rainbow*“ diverse Drogenerfahrungen und bedienten sich dabei der Farbenpracht des Regenbogens als Metapher für die Weiblichkeit.

Bezugnehmend auf den sprichwörtlichen Topf mit Gold am Ende des Regenbogens sang die Gruppe ABC um Martin Fry 1982 in dem Titel „*All Of My Heart*“: „No I won't be told there's a crock of gold at the end of the rainbow“.

Der französische Komponist Olivier Messiaen, der mit der Fähigkeit der Synästhesie begabt war, komponierte in seinem 1944 entstandenen „Quartett auf das Ende der Zeit“ (*Quatuor pour la fin du temps*) einen Satz mit dem Titel „Tanz der Regenbogen für den Engel, der das Ende der Zeit ankündigt“ (*Fouillis d'arc-en-ciel, pour l'Angel qui annonce la fin du temps*).



Joseph Anton Koch: *Heroische Landschaft mit dem Regenbogen* (1805). Im Gemälde ist rechts oben noch ein Nebenregenbogen.



Regenbogen über dem Künstlerort Collioure

Literatur

- Marcel G. Minnaert: *Licht und Farbe in der Natur*. Birkhäuser, Basel 1992, ISBN 3-7643-2496-1.
- Herch Moysés Nussenzweig: *The theory of the rainbow*. In: *Scientific American*, Vol. 236, No. 4, April 1977, S. 116–127
- Kristian Schlegel: *Vom Regenbogen zum Polarlicht. Leuchterscheinungen in der Atmosphäre*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2001, ISBN 3-8274-1174-2.
- Michael Vollmer: *Lichtspiele in der Luft. Atmosphärische Optik für Einsteiger*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2005, ISBN 3-8274-1361-3.
- Eugen Willerding, *Zur Theorie von Regenbögen, Glorien und Halos* pdf (1,4MB) ^[23]

Weblinks

- Fotos von Regenbögen ^[24], 30 Seiten
- Regenbogen und Geschichte seiner Erklärung ^[25], 2 Seiten
- Zur Deutung der inneren Regenbögen ^[26], 16 Seiten
- Unterrichtseinheit zum Thema Regenbogen (Gymnasium) ^[27], 36 Seiten
- mathematische Herleitung des Regenbogenwinkels ^[28], 4 Seiten (englisch)
- Überzählige Regenbögen/Interferenzregenbögen ^[29], 23 Seiten (englisch)
- Animation zum Strahlengang innerhalb eines Wassertropfens ^[30] (englisch)
- Der Regenbogen als Symbol ^[31], 4 Seiten

Einzelnachweise

- [1] Michael Vollmer: *Lichtspiele in der Luft. Atmosphärische Optik für Einsteiger*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2005, Seite 116f und Seite 124ff
- [2] Felix Billet: Titel: *Mémoire sur les Dix-neuf premiers arcs-en-ciel de l'eau* (http://www.numdam.org/item?id=ASENS_1868_1_5__67_0) In: *Annales scientifiques de l'École Normale Supérieure* Nr. 1/5, 1868, S. 67–109.
- [3] Werner Schnedier: *Wege in der Physikdidaktik, Band 5, Naturphänomene und Astronomie* (<http://www.wernerschneider.de/cms/upload/wege/band5/Wege5-42-56.pdf>). Palm & Enke, Erlangen und Jena 2002
- [4] Beverly T. Lynds: *About Rainbows* (<http://eo.ucar.edu/rainbows/>)
- [5] <http://www.meteoros.de/tau/tau.htm>
- [6] Kreuzende Regenbögen (http://www.wfs.be.schule.de/PotW/00_43/PotW.html) Wilhelm-Foerster-Sternwarte Berlin, Bild der Woche, Oktober 2000
- [7] Der Regenbogen des gespiegelten Sonnenlichts (<http://www.meteoros.de/spiegel/spiegel.htm>) Fachgruppe „Atmosphärische Erscheinungen“ der Vereinigung der Sternfreunde e.V.
- [8] Ungeklärte Regenbogeneerscheinungen (<http://www.meteoros.de/rainbow/regen-unbe.htm>), Fachgruppe „Atmosphärische Erscheinungen“ der Vereinigung der Sternfreunde e.V.
- [9] Eisbogen (<http://www.wissenschaft-online.de/artikel/854009>) (PDF, 2. Seite)
- [10] UQAC: René DESCARTES: *Les Météores* (<http://classiques.uqac.ca/classiques/Descartes/meteores/meteores.html>)
- [11] Claus Zittel (Herausgeber, Übersetzer und Kommentator): *René Descartes - Les Météores / Die Meteore*, Zeitsprünge, Band 10, Heft 1/2, Klostermann, Frankfurt 2006
- [12] Edmond Halley: *De Iride, Sive de Arcu Caelesti, Differtatio Geometrica, qua Methodo Directa Iridis Ntriusq.* Philosophical transactions 22, 1700/1701, S. 714-725
- [13] J. B. Calvert: *The Rainbow*, Online PDF (<http://www.du.edu/~jcalvert/astro/bow.htm>)
- [14] Beverly T. Lynds: *About Rainbows*, Online bei UCAR (<http://eo.ucar.edu/rainbows/>)
- [15] Mikolaj and Pawel Sawicki: *Supernumerary Rainbows*, Online (<http://www.jal.cc.il.us/~mikolajsawicki/rainbows.htm>)
- [16] H. Moysés Nussenzweig: *The theory of the rainbow*. Scientific American, vol. 236, No. 4, p. 116–127 (April 1977)
- [17] <http://www.bibleserver.com/go.php?lang=de&bible=EU&ref=Gen8%2C21>
- [18] <http://www.bibleserver.com/go.php?lang=de&bible=EU&ref=Gen9%2C14%E2%80%939315>
- [19] <http://www.bibleserver.com/go.php?lang=de&bible=EU&ref=Hes1%2C28>
- [20] <http://www.bibleserver.com/go.php?lang=de&bible=EU&ref=Offb10%2C1>
- [21] <http://www.bibleserver.com/go.php?lang=de&bible=EU&ref=Offb4%2C3>
- [22] Flagge des Jüdischen Autonomen Gebiets im *Flaggenlexikon* (<http://www.flaggenlexikon.de/fjudnrep.htm#Flagge>).
- [23] <http://www.astro.uni-bonn.de/~willerd/regenbogen.pdf>

- [24] <http://www.wetter-foto.de/fotos-23-1-1-Regenbogen.html>
- [25] <http://www.meteoros.de/rainbow/rainbow.htm>
- [26] <http://www.solstice.de/cms/upload/wege/band5/Wege5-42-56.pdf>
- [27] http://www.educ.ethz.ch/unt/um/phy/sw/regen/regenbogen_gesamt.pdf
- [28] <http://www.armchair.com/sci/rainbow.html>
- [29] http://www.usna.edu/Users/oceano/raylee/RainbowBridge/Chapter_8.html
- [30] <http://www.phy.ntnu.edu.tw/ntnujava/viewtopic.php?t=61>
- [31] <http://www.annette-boeckler.de/aboeckler/regenbogen.html>

bjn:Téja koi:ЕнѠшка

Remission (Physik)

Als **Remission** (von lateinisch *remittere* zurückschicken) bezeichnet man in der Physik die diffuse (ungerichtete) Reflexion von Wellen, insbesondere von Licht, im Gegensatz zur regulären gerichteten Reflexion, die das Reflexionsgesetz erfüllt. Häufiger wird aber in beiden Fällen von Reflexion gesprochen. Man unterscheidet dann zwischen spiegelnder und diffuser Reflexion.

Das oberflächenbezogene Maß für die Remission ist der Remissionsgrad. Das Verhältnis von remittierter zu eingestrahelter Energie in Prozent nennt man Albedo-Wert.

Remission von Licht

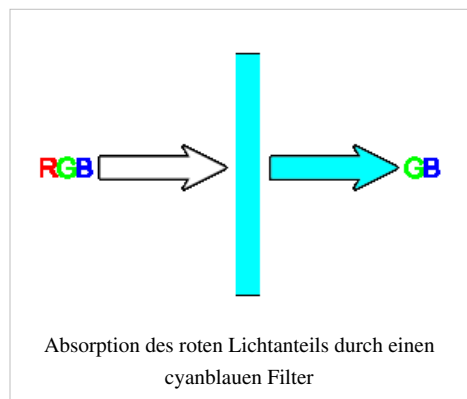
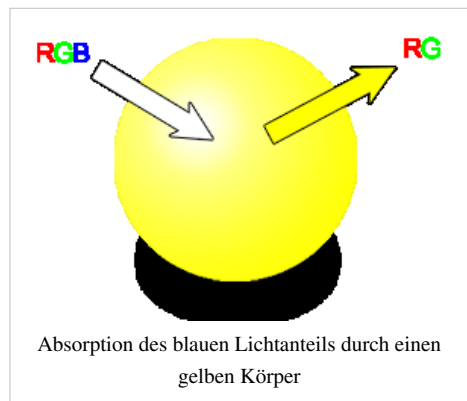
In der Optik und Reproduktionstechnik spricht man von *Remission*, wenn ein Körper einen Teil des Lichtspektrums absorbiert (Opazität) und einen Teil des Spektrums transmittiert (transparente Medien) bzw. reflektiert (undurchsichtige Medien).

Nimmt man beispielsweise einen gelben Körper und bestrahlt diesen mit Tageslicht, das das gesamte Lichtspektrum umfasst, so emittiert bzw. reflektiert er den roten und den grünen Lichtanteil, absorbiert aber den Blauanteil. Der Körper wirkt durch die Addition der zurückgeworfenen roten und grünen Lichtanteile gelb.

Ein anderes Beispiel sind Farbfilter. Diese Filter bestehen meist aus gefärbtem Glas und transmittieren nur bestimmte Farbanteile, sind also nur für diese Spektralanteile durchlässig, und absorbieren das Restspektrum. Für einen cyanfarbigen Filter bedeutet das, dass er nur den grünen und blauen Farbanteil von (weißem) Tageslicht durchlässt und den Rotanteil filtert.

Siehe auch

- Chemisch-physikalische Grundlagen für die Farbigkeit eines Stoffes



Literatur

- *dtv-Lexikon der Physik*, 1971, Artikel Remission

RGB-Farbraum

Ein **RGB-Farbraum** ist ein additiver Farbraum, der Farbwahrnehmungen durch das additive Mischen dreier Grundfarben (*Rot*, *Grün* und *Blau*) nachbildet.

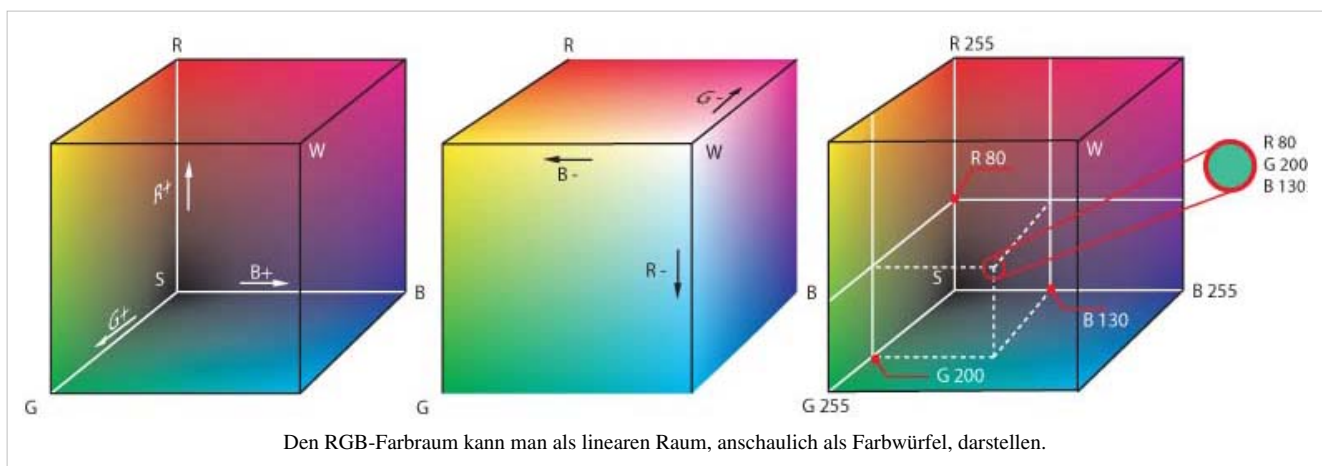
Dieser Farbraum basiert auf der Dreifarbentheorie. Das Farbsehen des Menschen ist durch drei Zapfentypen geprägt.

Grundlagen

Nach ersten Untersuchungen und Überlegungen zum Phänomen Farbsehen im 18. Jahrhundert führten vor allem wissenschaftliche Untersuchungen im 19. Jahrhundert zu ersten quantitativen Theorien. Eine davon ist die Dreifarbentheorie. Man kann fast beliebige Farbenreize durch das Mischen von drei Primärfarben nachbilden. Das Licht kann mit dem Spektrometer völlig unterschiedlich zwischen dem ursprünglichen Reiz und dem nachgebildeten Reiz zusammengesetzt sein. Das menschliche Auge kann dies aber nicht unterscheiden. Die beiden Farben sind metamere Farben. Kann man beide Farbreize nicht unterscheiden, so ist es auch nicht notwendig, die genaue spektrale Verteilung für eine Rekonstruktion der Farbtöne zu speichern. Um diesen Farbreiz nachzubilden, reicht es aus, ein Zahlentripel zu speichern, das die Menge an rotem, grünen und blauem Licht beschreibt.

Genau so wird eine Farbe im RGB-Raum beschrieben. Ist ein Rot, ein Grün und ein Blau in maximaler Intensität definiert, so können der Rotanteil R, der Grünanteil G und der Blauanteil B die Farbe beschreiben.

$$\text{Farbe} = \langle R, G, B \rangle$$



Die Wertebereiche für die Farbreize (R, G, B) können unterschiedlich festgelegt sein. Die klassische Darstellung lässt Werte zwischen 0 und 1 (ergo 0 Prozent und 100 Prozent) zu. Dies orientiert sich an der praktischen klassischen Realisierung mittels Dämpfung von vorhandenem Licht. Computerorientierte Anwendungen verwenden häufig die an der klassischen Form der Abspeicherung angelehnte Schreibweise, es werden Ganzzahlen zwischen 0 und einer Maximalzahl abgespeichert. Solche üblichen Maximalzahlen sind 7, 31, 255, 1023, 4095, 16383, 65535.

Da die Intensitätswahrnehmung des Menschen nach der Weber-Fechner-Regel nichtlinear ist, wird meist eine nichtlineare Kodierung für die Intensitäten vorgenommen. Diese bezeichnet man häufig als Gamma-Funktion, da die ersten Implementierungen die Funktion $x \sim I^\gamma$ als Ansatz nutzten. Der Koeffizient Gamma beschrieb dabei die Krümmung der Kurve. Die inverse Funktion war mathematisch einfach durch $I \sim x^{1/\gamma}$ zugänglich.

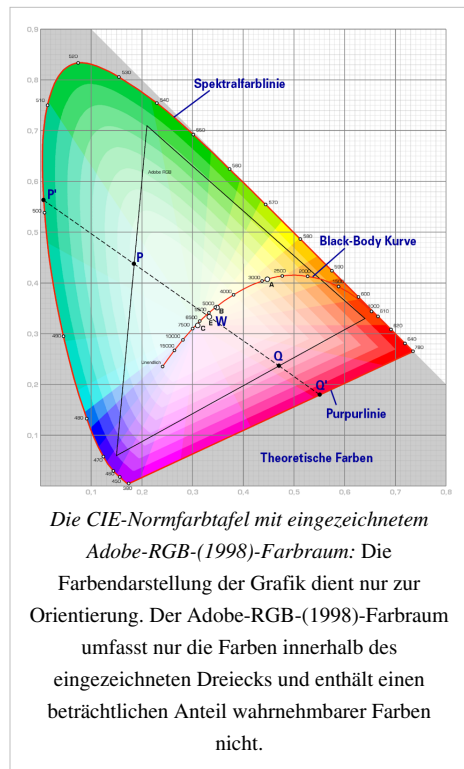
Das Koordinatensystem hat neben dieser nichtlinearen Kodierung insgesamt 9 Freiheitsgrade, die für einen konkreten RGB-Raum festzulegen sind. Diese kann man verschieden angeben, was zu Verwirrungen beim

Anwender führen kann.

- (x,y) aller drei Primärvalenzen und des Weißpunkts, Referenzhelligkeit.
- (Y,x,y) aller drei Primärvalenzen
- (X,Y,Z) aller drei Primärvalenzen

Moderne computerorientierte Applikationen und Schnittstellen verwenden zumindest intern immer mehr Gleitkommazahlen, die sowohl aus dem Intervall [0,1] ausbrechen, wie auch größere Wertebereiche mit gleicher relativer Genauigkeit von Haus aus darstellen können (16 Bit \approx 12 Größenordnungen, 32 Bit \approx 83 Größenordnungen). Auch entfällt die Festlegung einer Maximalhelligkeit, man speichert die absoluten Helligkeiten ab. Die Anzahl der Freiheitsgrade reduziert sich auf 6, der Farbwürfel wird zu einem Vektorraum.

Das farbige Feld des XYZ-Raumes steht für die Menge aller sichtbaren Farben. Das CIE-Normvalenzsystem wird anschaulich durch den Farbkörper nach Rösch wiedergegeben. Über ICC-Profile werden für die Farbeingabe- und Farbausgabegeräten, wie Monitor, Scanner, Drucker, die jeweils notwendigen Farbräume (RGB, CMYK) transformiert. Diese Transformation ist aber nicht eineindeutig möglich. Der materiell jeweils realisierbare RGB-Farbraum liegt auf der Farbtafel, genauer im CIE-Farbraum innerhalb eines Dreiecks. Ein solches Dreieck ist in der nebenstehenden Darstellung schwarz umrandet. Durch unterschiedliche Umformungen (meist als 3×3-Matrix) der Zahlenwerte und mittlerweile bessere technische Verfügbarkeit gibt es unterschiedlich definierte und normierte Varianten (s-RGB, Adobe-RGB, Bruce-RGB).^[1]



Anwendung

Der RGB-Farbraum wird für selbstleuchtende (farbdarstellende) Systeme benutzt, die dem Prinzip der Additiven Farbmischung unterliegen, auch *Lichtmischung* bezeichnet. Nach Graßmanns Gesetzen lassen sich Farben durch drei Angaben definieren, im RGB-Farbraum sind dies der Rot-, der Grün- und der Blauanteil. Die konkrete Form des Farbraums hängt vom jeweils konkreten technischen System ab, für das der jeweilige Farbraum bestimmt wurde.

sRGB (Standard-RGB) wurde für Monitore entwickelt, deren farbgebende Basis drei Phosphore (Leuchtstoffe) sind. Solch ein Stoff gibt beim Auftreffen von Elektronen ein Spektrum von Licht ab, dabei sind geeignete Leuchtstoffe solche mit schmalbandigen Emissionen bei Wellenlängen im Bereich der Wahrnehmungsqualitäten Blau, Grün, Rot. Der Betrachter bekommt den im RGB-Farbraum definierten Farbeindruck (bei genügendem Abstand vom Bildschirm gehen die Pixel additiv in einander über). Die Intensität des Anregungsstrahls entspricht dem Tripel im RGB-Farbraum und kann beispielsweise als Dezimalbruch (0 bis 1 oder 0 bis 100 %) oder diskret mit 8 Bit pro Kanal (0...255) angegeben werden (8-Bit-TIFF). Je nach Anwendungsart sind dabei bestimmte Wertdarstellungen bevorzugt.

Mit größeren Speichermedien wurden Tonstufen von 16 Bit pro Kanal möglich. So sind dreimal von 0 bis 65535 (2^{16}) möglich, also insgesamt 281 Billionen Farben, beispielsweise beim 16-Bit-TIFF und 16-Bit-PNG). Gute technische Ausgabesysteme können mehr Farben wiedergeben als der Mensch unterscheiden kann, selbst der trainierte Mensch kommt nur auf etwa 500 000 Farbtönen.^[2] Für spezielle Anwendungen sind 16-Bit-Werte allerdings durchaus sinnvoll. Bei Auswertungen in der Röntgendiagnostik sind so exaktere Betrachtungen möglich.

Die Farbwiedergabe in Fällen wie Farbbilder vom PC-Drucker, Farbfotos auf Silberhalogenidbasis, der Druck einer Illustrierten, Farbbilder in Büchern geschieht durch Remission auf der präsentierenden Fläche. Hier gelten somit die Gesetze der subtraktiven Farbmischung, für die der CMY-Farbraum entwickelt wurde, wegen der Farbtiefe üblicherweise mit Schwarz für Farbtiefe als CMYK-Farbraum.

Die Darstellung des RGB-Farbraumes erfolgt (weniger anschaulich als bei anderen Farbräumen) im kartesischen Koordinatensystem als Würfel. Die Abbildung zeigt links den Blick auf die Rückwand, in der Mitte den Aufblick, rechts einen Einblick ins Innere. Rot-, Grün- und Blau-Anteile folgen den Achsen; in den Ecken sind Gelb, Magenta, Cyan zu finden. Am Koordinatenursprung: $R=G=B=0$ befindet sich Schwarz, entlang der Raumdiagonalen Grau bis zum Eckpunkt in Weiß.

Anwendung von RGB-Farbräumen zur Bildwiedergabe

RGB-Farbräume als additive Farbräume dienen als Grundlage zur Darstellung von Farbbildern mittels Bildwiedergabegeräten, die Farben aus drei oder mehreren Farben additiv zusammenstellen. Neben CRT- und TFT-Displays sind dies auch Videoprojektoren.

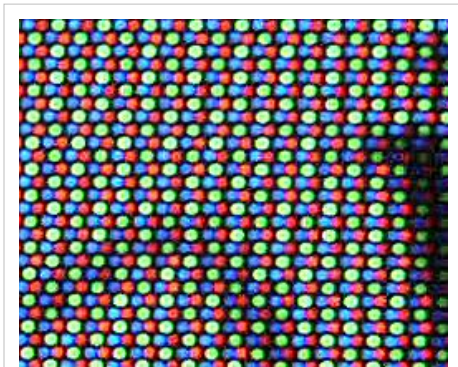
Dabei ist es unerheblich, wie die einzelnen Farbkanäle angesteuert werden, ob durch ein analoges oder ein digitales Signal mit 5, 8, 10 oder 16 Bit pro Farbkanal).

Üblicherweise werden die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau zur Darstellung genutzt. Zur Vergrößerung des Gamut oder der Maximalhelligkeit können aber auch mehr Farben zum Einsatz kommen. So können durch das Vieleck abgedeckte Farben besser dargestellt werden, zumindest bei geringeren Helligkeiten. Die Beschränkung auf das vom Hufeisen umschlossene RGB-Dreieck entfällt. Zur Vergrößerung der Maximalhelligkeit kann auch Weiß als weitere Grundfarbe genutzt werden. So sind größere Helligkeiten, jedoch unter weiterem Verlust von Gamut, darstellbar. Beide Möglichkeiten werden bei DLP-Projektoren benutzt.

Allerdings ist in diesen Fällen eine weitere Verarbeitung der RGB-Daten der Graphikkarte durch das Ausgabegerät notwendig. Im Fall der Mehrfarbprojektion ist ein geeigneter Arbeitsfarbraum der Graphikkarte notwendig, um die Vorteile nutzen zu können.

Die Eckpunkte des RGB-Farbartdreiecks können willkürlich gewählt sein, sie sind *nicht* durch die Verfügbarkeit von Leuchtstoff-Kristallen beschränkt. Es besteht kein untrennbarer Zusammenhang zu den drei (Grund-)Lichtfarben, die die Leuchtstoffe des Ausgabegerätes erzeugen können. Farbwerte außerhalb des durch die Eckpunkte bestimmten Dreiecks können nicht dargestellt werden. So fehlen bei einer Bildröhre viele der kräftigen, satten Grün- und Blautöne, die in der Natur vorkommen, und auch das spektralreine Rot und Violett fehlt im RGB-Raum.

Werden die Leuchtstoffe eines Bildschirms durch LEDs oder ähnliche Elemente für Rot, Grün, Blau eingesetzt ändert sich an der farblichen Wirkung gegenüber dieser Beschreibung nichts, vorausgesetzt sie können den verwendeten RGB-Raum abdecken. Beispielsweise besitzen Flachbildschirme keine Bildröhre und erzeugen die Farben durch elektrische Feldanregung. Andere Leuchtstoffe bedingen eine andere Lage des RGB-Dreiecks (dargestellt auf der xy-Farbsohle). Technische Anforderung ist es, die Lage der Diagramm-Eckpunkte für LC-Display möglichst an die Lage in Bildröhren anzupassen. Gelingt dies nicht, muss eine mathematische Umrechnung erfolgen, wodurch jedoch Farben wegfallen können, da die Koordinaten keine negativen Werte haben können. Unterbleibt auch die Umrechnung, werden die Farben verzerrt dargestellt. So werden möglicherweise Farbnancen zwischen Rot und (Gelborange) auf unterschiedlichen Geräten merklich verschieden dargestellt.



In Monitoren werden darstellbare Farben mit Rot, Grün und Blau verfügbar gemacht.

Anwendung von RGB-Farbräumen zur Bildaufnahme

Obwohl es dem ersten Anschein nach so aussieht, als wenn die Bildaufnahme den gleichen Gesetzmäßigkeiten unterliegt wie die Bildwiedergabe, so gibt es für die Bildaufnahme grundlegende Unterschiede zur Bildwiedergabe:

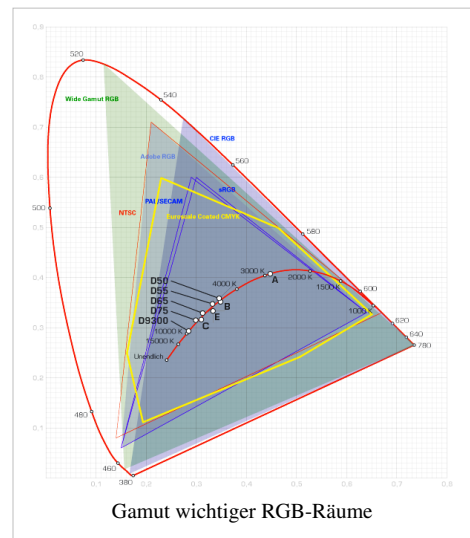
- Ungünstige Spektren für die Primärvalenzen führen bei der Bildwiedergabe nur zu einem kleinen Gamut, innerhalb dieses kleinen Gamut ist aber eine perfekte Wiedergabe der Farben möglich (das Dreieck wird klein).
- Nicht geeignete spektrale Empfindlichkeiten der Primärfarben eines Bildaufnahmeegerätes führen zu meist nicht korrigierbaren Farbfehlern (man verbiegt das Hufeisen)
- Es ist nicht möglich, einen Monitor zu bauen, der alle vom Menschen wahrnehmbaren Farben darstellen kann.
- Die Dead- und Hot-Pixel einer Kamera lassen sich ausmappen, für ein Display ist es nicht problemlos möglich.

Übliche RGB-Farbräume

Im Prinzip gibt es unendlich viele Farbräume, die durch Definition der Primärvalenzen, des Weißpunkts und der Gradationkurve (Gamma) festgelegt werden (genau das erfolgt in Matrix-ICC-Profilen). Die Primärvalenzen legen das Farbdreieck der bei geringen Helligkeiten darstellbaren Farben fest, der Weißpunkt das Intensitätsverhältnis für Farbtupel mit drei identischen Komponenten, damit indirekt auch das Verhältnis von maximalem Rot zu maximalem Grün und Blau.

Die folgende Aufstellung gibt einen Überblick über die Historie der üblichen RGB-Farbräume.

1. CIE-XYZ-Farbraum
2. CIE-RGB-Farbraum
3. NTSC-RGB
4. Farbraum von PAL und SECAM
5. sRGB-Farbraum
6. Adobe-RGB
7. Wide-Gamut
8. eciRGB
9. ProPhoto-RGB
10. Weiterentwicklung



Der CIE-XYZ-Farbraum

Dieser XYZ-Farbraum aus dem Jahre 1931 ist der erste Normierungsversuch weltweit ein einheitliches Darstellungssystem zu finden. Der Ausgangspunkt dafür waren die experimentell ermittelten Zapfenempfindlichkeiten. Die angewandte Messtechnik und die Versuchsauswertung entspricht dem Stand der Technik der 1920er Jahre. Dennoch wird der Farbraum auch heute noch häufig in der Praxis eingesetzt. Die Farbmessung zu dieser Zeit nutzte dabei den „Trick“, dass man bei Lichtfarben durch Zumischen von Licht auf der „Istseite“ sozusagen negative Farbreize auf der „Sollseite“ erzeugen kann. Der XYZ-Farbraum sollte alle vom Menschen wahrnehmbaren Farben umfassen. Zwar ist der XYZ-Farbraum vorrangig ein Messfarbraum, aber er kann auch zur Darstellung von Farben genutzt werden.

Da er das gesamte „Hufeisen“ aller Farbarten umschließt, werden durch ihn alle existierenden Farben erfasst. Das Hauptproblem besteht in seiner Ungleichmäßigkeit. Im Grün sind die als gleich empfundenen Farbabstände größer als im Rot oder Blau. Die Primärvalenzen dieser Darstellung sind keine real existierenden Farben, sondern so gewählt, dass die Farbkoordinaten einfach darzustellen sind. Es gibt also keine wirklichen Farbkörper in RGB, die

diesen Farbraum wiedergeben könnten.

Der CIE-RGB-Farbraum

Der *reelle* CIE-RGB-Farbraum entsteht durch die Umrechnung des *virtuellen* CIE-XYZ-Farbraums (der auf nicht darstellbaren Farbreizen beruht) auf die Eichreize von gut darstellbaren Spektrallinien:

- rot: 700 nm (praktisch sind für das menschliche Auge alle Wellenlängen oberhalb von 650 nm farbgleich, daher sind praktisch alle Spektrallinien oberhalb von 650 nm nutzbar, z. B. die tiefrote 690,7-nm-Hg-Linie)
- grün: 546,1 nm (grüne Hg-Linie)
- blau: 435,8 nm (blaue Hg-Linie)

Damit erreichte man eine fast perfekte Abdeckung von Rot, Orange, Gelb und im Blau- und Violett-Bereich. Deutliche Schwächen liegen allerdings im Türkis- und Grünbereich durch die unglückliche Wahl des Grünreizes.

Insbesondere sind nicht alle CMYK-Farben darstellbar, wiederum vor allem im Grün- bis Türkisbereich (480 nm bis 510 nm).

Der Farbraum des frühen NTSC

Bei Einführung des NTSC-Farbfernsehens im Jahre 1953 wurden als Primärvalenzen die (damals) verwendeten Farbphosphore verwendet:

- rot: Europium-dotiertes Yttrium-Vanadat ($\text{Eu}^+ \text{YVO}_4$)
- grün: silberdotiertes Zink-Cadmiumsulfid ($\text{Ag}^+ \text{ZnS/CdS}$)
- blau: Zinksulfid (ZnS)

Die Primärvalenzen ergeben sich aus den Emissionsspektren der verwendeten Phosphore. Der klassische NTSC-Farbraum wurde 1979 durch die ATC (Vorgänger der ATSC) durch einen dem EBU-Farbraum ähnlicheren SMPTE-C-Farbraum ersetzt.

Farbraum von PAL und SECAM sowie späteres NTSC (EBU 3213, ITU-R BT.470-2, SMPTE-C)

Praktisch parallel zur Normierung der Farbdarstellung für Computermonitore mit sRGB wurden auch die Farbfernsehnormen überarbeitet und angepasst. Da im Prinzip für beide technische Systeme die gleichen elektronisch angeregten Ausgangssubstanzen zur Verfügung stehen, sind die Möglichkeiten zur Darstellung von Farben fast gleich. Wie beim sRGB-Farbraum wurden besonders die Farbwiedergaben im Grün gegenüber einer besseren Rot- und Blaudarstellung zurückgestellt.

Es kam zu parallelen Normungen, sodass neben dem EBU/ITU-R-Farbraum auch ein geringfügig abweichender SMPTE-C-Farbraum existiert. Mit der Einführung von HDTV setzt sich wohl zunehmend der sRGB-Farbraum auch für Fernschanwendungen durch.

Der sRGB-Farbraum

Der sRGB-Raum entstand im Jahre 1996 durch eine Kooperation von Hewlett-Packard und der Microsoft Corporation.

Bei direkter Darstellung der gespeicherten Farbtupel sollte es ohne Farbmanagement möglich sein, eine gute Farbwiedergabe zu erzielen. Die Zielgröße war ein direkter Zusammenhang zwischen Anregung und wiedergegebener Farbe. Der sRGB ist in CCIR Rec 701 (XA/11) beschrieben.

Auch dieses Farbmodell orientierte sich an den verfügbaren Leuchtstoffen und zeigt Schwächen bei der Darstellung gesättigter Rot-, Grün- und Blau-Töne. Es sind nicht alle mittels CMYK-Siebenfarbendruck druckbaren Farben darstellbar. Vor allem im Grün- bis Türkisbereich (480 nm bis 510 nm) gibt es größere Defizite, die durch den folgenden Farbraum größtenteils behoben wurden.

Adobe-RGB-(1998)-Farbraum

Durch Adobe wurden 1998 Überlegungen umgesetzt, dass es möglich werden sollte, alle beim Druck relevanten Farben des CMYK-Farbraumes im neuen Adobe-RGB-(1998)-Gamut darzustellen.

Gegenüber sRGB ergeben sich deutliche Verbesserungen bei den Türkis- und Grün-Tönen. Allerdings hat man die Primärvalenzen so gelegt, dass die Darstellung von gesättigten Rottönen sich kaum verbessert hat, die von gesättigten Blautönen sogar leicht verschlechtert. Auf die Darstellung der häufiger auftretenden weniger gesättigten Töne macht sich die Umstellung aber nicht bemerkbar.

Der Kompromiss bestand darin, dass auf die Praxis abgestimmt ein Ausgleich in den häufigsten Farbwiedergaben in der Praxis gesucht wurde. Bei der Wiedergabe realer Bilder treten die hochgesättigten Farben seltener auf als die weniger gesättigten. Die Bildqualität bei der überwiegenden Anzahl von Farbwiedergaben ist hinreichend gut.

Der besondere Vorteil war, dass nahezu alle Farben des CMYK-Siebenfarbendrucks im RGB-Raum darstellbar sind.

Der Adobe-Wide-Gamut-RGB-Farbraum

Der Adobe-RGB war eine Weiterentwicklung, entspricht aber noch nicht den gesteigerten Anforderungen der Praxis. So ließen sich etwa Firmenfarben in der Werbung nicht durchgehend im Workflow von einer Geräteart zur anderen weitergeben. Deshalb wurde der sogenannte Wide Gamut, wiederum unter Federführung durch Adobe entwickelt.

Der Wide-Gamut-RGB arbeitet mit den Primärfarben 700 nm, 525 nm und 450 nm, und höheren Farbsättigungen an der technischen Machbarkeitsgrenze. Somit wird eine perfekte Abdeckung von Rot, eine fast perfekte Abdeckung von Violett und Blau und eine sehr gute Abdeckung von Grün-Tönen erreicht. Leichte Fehler im Bereich der extrem gesättigten Farben im Türkis und Grün zwischen 470 nm und 520 nm werden zugunsten der Anforderungen des praktischen Farbmanagements zurückgestellt.

Alle mittels CMYK-7-Farbendruck druckbaren Farben sind im Adobe-Wide-Gamut-Farbraum darstellbar.

European Color Initiative: Der eciRGB-Farbraum

Die *European Color Initiative* (ECI) wurde im Juni 1996 auf Initiative der Verlagshäuser Bauer, Burda, Gruner+Jahr und Springer gegründet. Sie beschäftigt sich mit der medienneutralen Verarbeitung von Farbdaten in digitalen Publikationssystemen. Dabei soll in allen eingesetzten Ein- und Ausgabemedien ein durchgehendes Farbmanagement möglich werden. Die Entwicklung der Druckmedien am Computer verlangt, dass das Druckergebnis auch dem Entwurf entspricht. Es wurde im Jahre 2002 die Version 1 entwickelt. Die aktuelle Version 2 ist in ISO 22028-2:2007 definiert. Hierzu liegen allerdings keine öffentlich zugänglichen Werte vor.

Der ProPhoto-RGB-Farbraum

Der ProPhoto-RGB-Farbraum (auch bekannt als ROMM-Farbraum, von englisch: *Reference Output Medium Metric*) ist eine andere Weiterentwicklung des Wide Gamut, wobei insbesondere die Anforderungen der Digitalfotografie beachtet wurden, insbesondere zur anschließenden Weiterverarbeitung. Dafür wurden die neuen Überlegungen, Forschungsergebnisse (wie der LMS-Farbraum) und praktischen Forderungen herangezogen. Er bringt eine perfekte Abdeckung *fast aller* wahrnehmbaren Farben. Ähnlich wie Wide-Gamut-RGB sind nur wenige sehr gesättigte Farben im Bereich von Türkisgrün und im Bereich des Violetts nicht darstellbar.

Die festgelegten Primärfarben für Blau und Grün sind allerdings wiederum keine real existierenden Farben.

Aktuelle Entwicklungen

Der RGB-Farbraum ist eine abstrahierte Darstellung für (Licht-)Farben. Durch geeignete Transformationen lassen sich alle Farbräume ineinander überführen. Bei einigen Transformationen werden Bereiche der umfassenderen Farbräume allerdings auf den Rand des begrenzteren Farbsystems abgebildet und die Transformation ist nicht immer umkehrbar. So kann man den RGB-Farbraum auf den Farben-Rhomboeder abbilden, aber in RGB nicht umgekehrt.

Werden RGB-Farben durch Gleitkommazahlen bezeichnet so kann auf notwendige nichtlineare Verzerrungen für Bilder und Bildkonvertierungen verzichtet werden, die Farbraumkonvertierungen werden zum größten Teil überflüssig. Moderne Programmierschnittstellen rechnen mit linearen Beziehungen im sRGB-Raum, so dass mit Unterstützung von Gleitkomma kein Gamut-Clipping nötig ist.

RGBY

Einen neuen Weg in der technischen Umsetzung geht Sharp 2010 bei seinen LCD-Fernsehern durch Einsatz einer vierten Farbe. Die Farbmischung wird mit zusätzlichen gelben Subpixeln neben den roten, grünen und blauen im dreidimensionalen Farbraum begründeten RGB-Subpixeln realisiert (RGBY). Ziel ist die bessere Farbwiedergabe der bislang kritischen Gelb-, Gold- und Brauntöne, auch die Wiedergabe von Hauttönen soll dadurch besser werden^[3].

Mittlerweile gibt es Mehrfarbenleuchtdioden, die neben dem klassischen RGB zusätzlich eine gelbe Leuchtdiode enthalten, wodurch der Farbverlauf verbessert wird. Im deutschen Handel werden diese häufig mit „RGGB“ gekennzeichnet.

RGBA-Erweiterung

Jedes der oben genannten Farbmodelle kann um einen oder drei Alphakanäle für Transparenzen erweitert werden.

Bei der Erweiterung von einem Alphakanal geht man davon aus, dass (teil-)transparente Medien alle drei Spektralfarben gleichmäßig durch ihre eigene Farbe ersetzen oder dämpfen. Mit diesem einfachen und allgemein üblichen Modell lässt sich allerdings gefärbtes Glas nicht darstellen.

Es gibt zwei Farbmodelle, die den Alpha-Kanal im Vordergrund entweder mit berücksichtigen (*straight*) oder nicht berücksichtigen (*pre-multiplied*).

Modelle mit einem Alphakanal (*straight*):

$$(R', G', B') = \alpha(R_v, G_v, B_v) + (1 - \alpha)(R_h, G_h, B_h)$$

Modelle mit einem Alphakanal (*pre-multiplied*):

$$(R', G', B') = (R_v, G_v, B_v) + (1 - \alpha)(R_h, G_h, B_h)$$

Modelle mit drei Alphakanälen (*straight*):

$$(R', G', B') = (\alpha_r R_v, \alpha_g G_v, \alpha_b B_v) + ((1 - \alpha_r)R_h, (1 - \alpha_g)G_h, (1 - \alpha_b)B_h)$$

Modelle mit drei Alphakanälen (*pre-multiplied*):

$$(R', G', B') = (R_v, G_v, B_v) + ((1 - \alpha_r)R_h, (1 - \alpha_g)G_h, (1 - \alpha_b)B_h)$$

(r, g, b = rot, grün, blau, v = Vordergrund, h = Hintergrund)

Das *RGBA-Farbmodell* ist im eigentlichen Sinn kein Farbmodell, sondern eine Erweiterung des RGB-Modells durch den (vierten) Alphakanal. Diese α -Komponente bestimmt die Transparenz eines Pixels, die für Überblendeffekte eine Rolle spielt. Wird ein Bild mit einem neuen Bild überschrieben, fließen die Informationen des vorhergehenden Urbildes mit in das neue Zielbild ein. Die Alphakomponente bestimmt, wie durchsichtig das entsprechende Pixel des Bildes sein soll. $\alpha = 0$ steht für völlige Transparenz, $\alpha = 1$ für völlige Lichtundurchlässigkeit.

Umrechnung zwischen verschiedenen RGB-Farbräumen

Zur Umrechnung zwischen zwei beliebigen RGB-Farbräumen sind folgende Operationen auszuführen:

- Zuerst sind nichtlineare Kennlinien (Gamma-Kennlinien) wieder zu entfernen. Bei linearen Kennlinien kann dieser Schritt entfallen:

$$(R, G, B) \longrightarrow (R_{\text{lin}}, G_{\text{lin}}, B_{\text{lin}})$$

- Als zweiter Schritt ist eine Matrixmultiplikation A auf diesen Vektor anzuwenden:

$$A_{ij}(R_{\text{lin}}, G_{\text{lin}}, B_{\text{lin}}) \longrightarrow (R'_{\text{lin}}, G'_{\text{lin}}, B'_{\text{lin}})$$

- Die Matrix A berechnet sich zu $A = A_{\text{quelle}} * [A_{\text{ziel}}]^{-1}$, dabei sind A_{quelle} und A_{ziel} die Primärvalenzen des Quell- und Zielraumes in beliebigen (aber gleichen Koordinaten).
- Ist der Zielraum nichtlinear, ist die nichtlineare Kennlinie des Zielraumes anzuwenden:

$$(R'_{\text{lin}}, G'_{\text{lin}}, B'_{\text{lin}}) \longrightarrow (R', G', B')$$

- Erlaubt der Zielraum keine Werte unterhalb eines gewissen Minimalwertes (z. B. 0,000 oder 0x00) bzw. oberhalb eines gewissen Maximalwertes (z. B. 1,000 oder 0xFF) und treten diese Werte bei der Transformation auf, dann ist die Farbe des Quellraums nicht im Zielraum darstellbar. Es sind geeignete Verfahren zur Reduzierung der Sichtbarkeit des Fehlers zu ergreifen.
- Ist der Zielraum quantisiert (z. B. auf 8 Bit oder 12 Bit), dann kommt es durch die Farbraumumrechnung weiterhin zu Rundungsfehler, die sich je nach Art der Rundung als Rauschen oder Banding bemerkbar machen können.
- Unterlässt man die Linearisierung und De-Linearisierung bei der Umrechnung, erhält man insbesondere bei gesättigten Farben deutliche Fehler. Trotzdem unterlassen es fast alle Softwareprodukte und Hardwareprodukte, diese Berechnungen sauber durchzuführen.

Für die Umrechnung von R-, G-, B-Koordinaten in X-, Y- und Z-Werte der CIE gelten für jeden konkreten RGB-Farbraum spezielle Abbildungsmatrizen. Dabei sind X ein virtuelles Rot, Y ein virtuelles Grün und Z ein virtuelles Blau. Für einen dieser Farbräume (hier sRGB) gilt folgende Abbildung:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +2,36460 & -0,51515 & +0,00520 \\ -0,89653 & +1,42640 & -0,01441 \\ -0,46807 & +0,08875 & +1,00921 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

Folgende Beziehungen zwischen RGB- und XYZ-Farbraum lassen sich daraus herleiten:

- Das virtuelle Grün, das identisch gesetzt mit dem Hellbezugswert A ist, läuft mit dem G-Wert, ändert sich weniger bei sinkendem Rotanteil, und ist kaum vom Blau abhängig.
- Dafür ist für das virtuelle Rot der R-Wert um etwas G zu verringern.
- Das Zapfen-Z, das virtuelle Blau, liegt über einem Nebenmaximum des virtuellen Rot, was den Abzug von R, aber kaum G bedingt.

Für unterschiedliche Geräteklassen wurden abweichende RGB-Räume genormt, die alle den gleichen Grundaufbau mit Rot-, Grün- und Blaukomponente besitzen.

Eigentlich hat jedes Gerät seinen eigenen Geräte-RGB-Farbraum, der aber üblicherweise zulässig innerhalb des genormten Farbraumes liegt. Individuelle Farbdifferenzen können durch Gerätetyp, Hersteller, Verarbeitungs- und Produktionseinflüsse, sowie durch Alterung entstehen. Hierfür gibt es (in bestimmten Grenzen) Möglichkeiten der Anpassung. Diese Methoden werden als Colormanagement zusammengefasst. Eine Mindestanpassung ist die Gammakorrektur. Soweit sich die Geräteparameter nachstellen lassen ist eine Anpassung des Gerätes an die genormten Größen möglich. Für höherwertige Anforderungen wird das Gerät individuell ausgemessen und über 3×3-Matrizen oder spezielle Listen (englisch: *Look-up-Table*, LUT) die Zuordnung von Geräte-RGB-Tripel mit dem Forderungstripel verknüpft.

Für digitale Bilddaten eignet sich der RGB-Farbraum lediglich zur Darstellung am Bildschirm und den verwandten Gerätetypen. Bilddaten für den Druck (Offsetdruck, Siebdruck, Digitaldruck) sind in einem subtraktiven Farbmodell zu reproduzieren (CMY, CMYK). Die Umrechnung von RGB in CMY ist dabei ein Wissensgebiet, das durchaus noch in der Entwicklung ist (verwiesen sei hierfür auf die ICC-Profile).

Probleme bei der Wahrnehmung

Grenzen in der Anwendung findet der RGB-Farbraum mit wahrnehmungsphysiologischen Problemen.

- Im RGB-Farbraum sind nicht alle Farbvalenzen enthalten. Insbesondere die gesättigten Spektralfarben erfordern negative Wiedergabeanteile (*äußere Farbmischung*), das wäre fehlendes Licht. Bei optischen Untersuchungen wird dieser Mangel durch zusätzliches Vergleichslicht behoben.
- Die Farbwahrnehmung ist nicht unabhängig von der absoluten Helligkeit. Die Erregung der Zapfen erfordert eine Mindestlichtmenge (Mindestanzahl an Photonen). Wird diese unterschritten, nehmen wir über die Stäbchen nur Hell-Dunkel-Reize wahr. Oberhalb einer Grenzleuchtdichte kommt es auch zu Blendungen, die ebenfalls das System der Farbrezeptoren stört.
- Die Farbwahrnehmung ändert sich über das gesamte Sichtfeld hinweg. In der Fovea ist die Farbwahrnehmung am besten; sie nimmt in der Peripherie aber deutlich ab. Die Rot-Grün Farbwahrnehmung nimmt in Richtung der Peripherie stärker ab als die Empfindlichkeit der Blau-Gelb-Wahrnehmung. Bei Abweichungen von mehr als 30° von der Sehachse ist nahezu keine Rot-Grün-Wahrnehmung mehr möglich. Andere Phänomene und Eigenschaften der Augen spielen ebenfalls eine Rolle, wie etwa der gelbe Fleck.
- Die Farbwahrnehmung hängt von Umgebungslicht und Umgebungsfarbe ab. Die Farbkonstanz des menschlichen Gesichtssinnes zeigt sich beim automatischen Weißabgleich und in Wahrnehmungstäuschungen.
- genetische Unterschiede beim Farbsehen sowie mögliche Farbfehlsichtigkeiten bis zu Farbungfähigkeit und auch Hirnläsionen nach Schlaganfällen oder Unfällen beeinträchtigen die Vergleichbarkeit. So kann geringere Empfindlichkeit einer Zapfenart durchaus zu besserer Unterscheidung in bestimmten Bereichen des RGB-Farbraumes gegenüber Normalsichtigen führen. Die normierte Vorgabe zeigt dann ihre Schwäche.

Es existieren zwei technische Angaben, die für eine exakte Wiedergabe eines Farbtones erforderlich sind. Zum einen die Lage der Grundfarben (Rot, Grün, Blau) bei voller Anregung aller Kanäle, also die „Mitte“ des xy-Farbartdiagrammes, bei $x = y = 1/3$ oder den Werten $R = G = B = 1$. Diese Farbe wird als Referenzweiß bezeichnet. Zum anderen ist es die Abhängigkeit zwischen Spannung der Anregungsstrahlung (etwa Kathodenstrahlung) zum Farbergebnis und der abgegebenen Lichtleistung (angenähert durch Gamma, genaue Angabe durch eine Funktion abhängig von der angelegten Spannung). Der logarithmische Zusammenhang zwischen Farbvalenz und Farbreiz, wie er von Ewald Hering bestimmt wurde, geht in diese Formel ein.

Es ist also für eine gute Farbdarstellung wichtig zu wissen, welche RGB-Norm eingesetzt wurde.

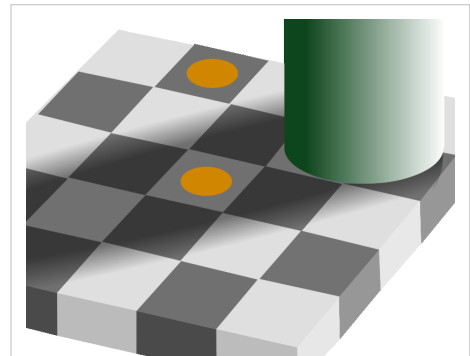
Die beiden ersten technischen Angaben sind in Normen für alle Hersteller festgelegt. Allerdings sind die Normungen der RGB-Farbräume in verschiedenen Gremien in Amerika (FCC, ATSC), Europa (EBU) und Japan unterschiedlich.

Grenzen

Ein RGB-Farbraum ist ein auf wenige, definierte Parameter begrenzter Ausschnitt der Wirklichkeit. Die Wahrnehmung eines „bunten“ Lichtes, einer „Oberfläche“, umfasst weitere Effekte. So könnte die Definition einer Farbe durch drei Zahlen die falsche Erwartung wecken, eine Farbe wäre in ihrer Wahrnehmung absolut bestimmt. Tatsächlich ist die Farbwirkung einer numerisch bestimmten RGB-Farbe dagegen vom konkret vorhandenen technischen System abhängig, das diese Farbe wiedergibt oder aufnimmt und auch von den internen und externen Umgebungsbedingungen.

Ein Beispiel:

Die Farbwerte 100 % Rot, 50 % Grün und 0 % Blau (rgb = 255,127,0) ergeben ein Orange, die Nuance des Orange kann auch bei guter Voreinstellung auf verschiedenen Wiedergabegeräten sehr unterschiedlich aussehen.



Der subjektive Einfluss der Helligkeit. Beide Farbflächen sind in RGB = {D1,86,00} \approx orange dargestellt, der Eindruck „Braun“ entsteht durch die Annahme einer dort helleren Beleuchtung. Selbst das umgebende Grau ist dasselbe RGB = {70,70,70}, wird aber hier als weißes Feld und dort als schwarzes Feld aufgefasst.

	Dieses Orange könnte auf verschiedenen Bildschirmen unterschiedlich aussehen.
Rot, Grün, Blau = hex{#FF8000}	Dies sollte der Fall sein, wenn das gleiche Signal auf benachbarte Kathodenstrahlröhre und TFT-Bildschirm gelegt wird. Benachbart: damit die Farben besser vergleichbar sind.

Sind der genaue Farbraum des Aufnahmesystems und der Farbraum des Wiedergabesystems bekannt und bleiben sie konstant, kann durch eine Umrechnung des Farbraumes eine dem Original weitgehend angenäherte Darstellung erreicht werden. Probleme bereiten Displays, die variierende, wie richtungs- oder temperaturabhängige Farbdarstellung aufweisen.

Farbkorrektur

Um vorhersagbare Farben in RGB-Systemen zu erhalten, sind Farbkorrekturmethoden nötig. Es finden Profile Verwendung, die beschreiben, wie Farben aussehen und damit den Farbraum für verschiedene Geräte umrechenbar machen. Typische Farbprofile, Betriebs-RGB-Räume, sind sRGB (standard RGB) oder Adobe-RGB für allgemeine Computerperipherie wie Monitore und Digitalkameras und ECI-RGB für den Einsatz im grafischen Gewerbe, zum Beispiel professionelle Bildbearbeitung). Ein angestrebtes Ziel ist der Wide-Gamut-RGB, der einen maximal erreichbaren Farbumfang definiert, der zu seiner Darstellung noch der Lösung harret. Für Transformation innerhalb des RGB-Farbraumes, also zwischen Betriebs-RGB-Räumen oder auch zwischen Geräte-RGB-Räumen werden 3x3-Matrizen genutzt. Eine andere Möglichkeit sind LUT (Look-up-Tables) die in Listenform Wertezuordnungen (Transformationstabellen) von $(R,G,B)_{\text{Quelle}}$ auf $(R,G,B)_{\text{Ziel}}$ enthalten. Zwischen den Stützstellen kann linear interpoliert werden. ICC-Profile sind solche (standardisierten) Hilfsmittel.

Siehe auch

- YCbCr-Farbmodell
- YUV-Farbmodell
- HSV-Farbraum
- Bildauflösung

Weblinks

- Farbtabelle mit RGB- und Hex-Werten ^[4]
- Ein Farbmisch-Experiment in RGB ^[1]
- Die Umrechnung und Parameter in und aus RGB-Farbräumen ^[5]
- sRGB-Standard ^[6] (engl.)
- Farbtafeln zu den RGB-Farben ^[7]
- RGB-Farbmixer Java-Applet ^[8]
- RGB-Farbmixer Flash-Applikation ^[4]
- Fernsehfarben ^[9]
- Tabelle und Grafik von Arbeitsfarbräumen ^[10]
- Vergleich von Adobe-RGB und sRGB ^[11] (Englisch)
- Vergleich von Adobe-RGB und anderen Farbräumen ^[12] (Deutsch)
- Colour difference coding in computing ^[13]
- Farbe für den Bildschirm ^[14]

Einzelnachweise

- [1] umfangreiche Sammlung von Beispielen, Umrechnungsmatrizen und Transformationsformeln bei www.bruceindbloom.com (<http://www.bruceindbloom.com>)
- [2] Das Auge: Physiologie des Sehens (3sat) (<http://www.3sat.de/3sat.php?http://www.3sat.de/davinci/115145/index.html>)
- [3] Vier Farben statt drei Dimensionen (<http://www.heise.de/newsticker/meldung/Vier-Farben-statt-drei-Dimensionen-957465.html>)
Heise.de-Newsticker vom 18.März 2010 08:56
- [4] <http://www.farb-tabelle.de/>
- [5] <http://www.bruceindbloom.com/index.html?WorkingSpaceInfo.html#Specifications>
- [6] <http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB>
- [7] <http://www.wackerart.de/rgbfarben.html>
- [8] <http://www.wackerart.de/mixer.html>
- [9] <http://www.beepworld.de/members99/hdtv/fernsehfarben.htm>
- [10] <http://capture-nx.webtivation.at/farbraum.htm>
- [11] <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/sRGB-AdobeRGB1998.htm>
- [12] http://foto.beitinger.de/adobe_rgb/
- [13] <http://scanline.ca/ycbcr/>
- [14] <http://www.itp.uni-hannover.de/~zawischa/ITP/crtcolor.html>



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**:

Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Rot

Rot: RGB: FF0000

Rot ist der Farbreiz, der wahrgenommen wird, wenn Licht mit einer spektralen Verteilung ins Auge fällt, dessen Maximum im Wellenlängenintervall oberhalb 600 nm liegt. Während die meisten Säugetiere Probleme haben, die Farbe Rot wahrzunehmen, reagiert das menschliche Auge sehr empfindlich darauf. Entsprechend häufig findet diese Farbe Verwendung bei Warnsignalen. Rot erhielt in der Entwicklung der meisten Sprachen sehr früh ein eigenes Wort, gleich nach der sprachlichen Unterscheidung von „Hell“ und „Dunkel“.^[1] Das althochdeutsche Wort „rôt“ entwickelte sich aus dem germanischen „rauðaz“ und dem indogermanischen **h₂ereúdh* und bezeichnete die Farbgebung von Kupfer, Gold und anderen Metallen.

Der Farbeindruck „Rot“ entsteht bei Anregung der L-Zapfen. Rot kann in Richtung Blau oder Gelb tendieren, es kann heller oder dunkler sein. Orangerot wird wahrgenommen, wenn nur der langwellige Bereich des Spektrums wirksam ist; Magentarot, wenn dazu noch ein kurzwelliger Anteil kommt (Farbmischung).



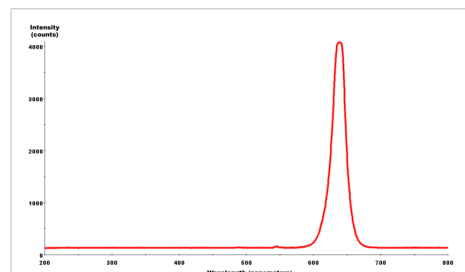
Farbbezeichnungen nach dem Farbtonkreis von Müller in der CIE-Normfarbtafel. Rechts außen der Rotbereich: *Zinnoberrrot, Mittelrot, Karminrot, Purpurrot*

Farblehre

Die Spektralfarbe

Licht mit dem Farbreiz „Rot“ hat eine spektrale Verteilung am (oberen) langwelligen Ende des sichtbaren Bereiches der elektromagnetischen Strahlung. Zu höheren Wellenlängen schließt sich die infrarote Strahlung an. Da ein Körper beim Erhitzen mit zunehmender Temperatur Wärmestrahlung höherer Frequenz emittiert, beginnen erhitzte Körper zunächst rot zu glühen.

Die im menschlichen Auge für das Rotsehen verantwortlichen Sinneszellen haben ihr Empfindlichkeitsmaximum bei 560 nm, ihre Wirksamkeit reicht definitionsgemäß bis zur Grenze der Sichtbarkeit.



Spektrum der LED einer optischen Maus, Maximum ca. 640 nm

Farbspektren

Die farbtongleiche Spektralfarbe zu Rot liegt bei zwischen 600 und 750–800 nm farbmétrisch an der unteren Schwelle des Sehspektrums, im CIE-Diagramm in der rechten Spitze. Tatsächlich erkennt man als „rot“ Licht – auch als Körperfarbe wiederum remittiert – dann, wenn in einem Emissionsspektrum (bzw. Remissionsspektrum) eine steile Flanke im Bereich von etwa 500 nm bis 650 nm liegt, also überwiegend langwelliges Licht im Spektrum vorhanden ist (→ Farbmischung). Jedoch sieht das Auge auch dann ein Rot, wenn sich im kurzwelligen Bereich noch Blau dazumischt. Diese *blaustichigen* oder *kühlen Rots* haben keine reine Spektralfarbe als äquivalent mehr, sondern befinden sich auf der Purpurgerade des CIE-Diagramms, die die Mischreizung der R-Zapfen und L-Zapfen darstellt.

Darstellung in Farbsystemen

In der additiven Farbmischung ist Orangerot eine der Grundfarben, in der subtraktiven entsteht es aus Magentarot und Gelb. Die Komplementärfarbe ist Cyanblau.

Reines Rot hat im RGB-Farbraum den Wert $RGB = (1;0;0)$. In der im Computerbereich üblichen Darstellung mit einem Byte je Grundfarbe („true color“) entspricht das dem Wert (255;0;0) dezimal beziehungsweise FF0000 hexadezimal. Im Lab-Farbraum wird rot etwa durch $L^*a^*b^* = \{100;70;0\}$ angegeben. In Worten ausgedrückt: „schön leuchtend, weder gelb, noch blau, gegenteilig zu grün“.

Visuelle Effekte

Das langwellige Licht wird an kleinen Teilchen in der Luft am wenigsten stark gestreut, weshalb Sonnenauf- und Untergänge rot erscheinen und der Mond bei Mondfinsternissen rötlich leuchtet (durch das in der Erdatmosphäre schwach gestreute rote Licht). Aus dem gleichen Grund ist rotes Licht durch Nebel weiter sichtbar als andere Farben, weshalb es bei Eisenbahn und im Straßenverkehr als Halte-Signal und Schlusslicht eingesetzt wird. Eine Anwendung ist das Alles-Rot bei Signalanlagen.

Wasser absorbiert rotes Licht am besten, weshalb unter Wasser schon in relativ geringen Tiefen kein Rot mehr wahrgenommen werden kann.

Einige Insekten, beispielsweise Bienen, haben keine Rezeptoren für rotes Licht. Rote Blumen nehmen sie als schwarz wahr. Ihre Wahrnehmung ist in Richtung Ultraviolett verschoben, dadurch können sie die (für Menschen) weißen Blüten besser unterscheiden. Auch rote Blüten haben unterschiedliche ultraviolette Farbmuster.

Beim Menschen kann es zu Unregelmäßigkeiten bei der Wahrnehmung der Farben kommen, näheres dazu findet sich unter Rot-Grün-Sehschwäche, einer Farbfehlsichtigkeit.

Farbnuancen und Farbmittel

Eine Übersicht zu entsprechenden Farbmitteln steht in der Liste der Pigmente #Rot und der Liste der Farbstoffe #Rot bereit.

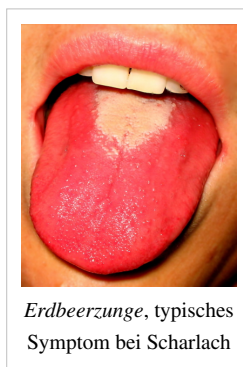
Für den ganzen Rotbereich geeignet sind folgende Farbmittel:

- *Cadmiumrot*, giftig
- *Rote Erden*, die Gruppe der roten Erdpigmente einschließlich der *Eisenoxidrote*, die nicht voll farbgesättigt sind

Heute verwendet man überwiegend synthetische Pigmente:

- *Chinacridonrot*
- *Perylenrot* (MePTCDI, PTCA)

Orangerot, Scharlachrot



Erdbeerzunge, typisches Symptom bei Scharlach

Orangerot

Gelbstichige Rottöne nennt man *Orangerot*, weil es in Richtung der Farbe Orange tendiert, oder *Scharlachrot*, in der Farbe des Zungenausschlags bei der so benannten Kinderkrankheit Scharlach. Dieser Farbname hat das ältere „Karmin(rot)“ ersetzt.

Zinnoberrot, Permanentrot, Feuerrot

Zinnoberrot ist ein leicht ins gelbe tendierendes Rot. Es ist die Grundfarbe in der Computergrafik. Die Fluoreszenz der Leuchtstoffe von Monitoren entspricht diesem Farbton. Am Bildschirm wird es mit $\{RGB\} = (FF,00,00)_{hex}$ dargestellt. RAL-Bezeichnungen sind RAL 3000 *Feuerrot*, 3001 *Signalrot* oder 3024 *Leuchtröt*.

Organische Farbmittel in dieser Nuance sind nach Handelsnamen *Permanentrot*, von der Konfiguration her gehören Perylenrot und Chinacridonrot dazu. Anorganische Farbmittel sind die schwermetallhaltigen Pigmente, die teilweise nur noch historisch bedeutsam sind.

- *Zinnober*, als Mineral Cinnabarit, ist die rote Modifikation von Quecksilbersulfid. Da diese Verbindung sehr stabil das Quecksilber bindet, gilt sie als ungiftig.
- *Cadmiumrot*, giftig
- *Saturnrot*, *Pariser Rot*: Mennige, ein giftiges Bleipigment, historisch, wird auch als Eisenmennige imitiert
- *Realgar* ist ein Arsenpigment und giftig.
- *Chromrot* ist wegen des Chromgehaltes giftig.

Mittelrot, Hochrot, Blutrot



Mittelrot

Venöses Blut einer frischen
Schnittwunde

Visuell reines Rot ist *Mittelrot* oder *Hochrot*, oder vergleichend *Blutrot* nach der Farbe frischen Blutes. Der Farbton wird im RAL-Farbsystem als 3020 *Verkehrsrot* oder 3003 *Rubinrot* geführt.

Ein CIE-korrektes Mittelrot (1,0,0) ist am Computermonitor nicht vollsatt darstellbar. Röhrenmonitore zeigen eine deutlich farbtiefere Darstellung als handelsübliche Flüssigkristallbildschirme.

Farbmittel werden unter dem Namen *Echtröt* gehandelt, auch von mineralischen Zinnober oder Cadmium- und Chromrot gibt es hochrote Sorten.

Karminrot, Purpurrot, Weinrot

Purpurrot



Herbstfärbung des Wilden Weins (*Parthenocissus quinquefolia*)

Purpurrot oder *kühles Rot* bezeichnet man den Übergangsbereich der Farben, die in Richtung Violett und Blau tendieren. *Weinrot* steht vergleichend zum typisch roten Herbstlaub der Weinrebe.

Namenprägende Farbmittel sind:

- *Purpurrot*, der Farbstoff Purpur, ein Bromindigo, der lange Zeit das edelste leistungsstarke Farbmittel für diesen Farbbereich war, als echter Schneckenpurpur
- *Karminrot*: Karmin (Karmesin, Cochenille), ein ebenfalls hochwertiges Färbemittel, das unter anderem aus Brasilholz, Orcein, Lackschildlaus, Kermeslaus und Cochenilleschildlaus gewonnen wurde.
- *Krapprot* (*Alzarinrot*): Krapplack, aus dem Färberkrapp und anderen Färberpflanzen, heute synthetisch

Erster brauchbarer Ersatz war:

- *Kadmiumrot foncé* („dunkel“), giftig

Heute verwendet man neben Chinacridon und Perylen besonders

- Cochenillerot A (E 124), ein Azofarbstoff, auch als Lebensmittelfarbe

Auch kühles Rot ist am Computermonitor nur unter deutlichen Kompromissen darstellbar.

Braunrot

Florentiner Rot, Marsrot

Ausmischungen in das Schwarze und Graue ergeben die *Braunrot* oder *gebrochenes Rot* genannten Nuancen. Sie können die ganze Breite von gelbstichigen bis zu purpurnen Farbtönen umfassen

Reine Farbmittel sind die roten Erden.

- Eisenoxidrot: *Persischrot*, *Venetianischrot*, *Florentinerrot*, *Titianrot*, *Marsrot*
- Roter Bolus, Rötzel, oder die gebrannten Erden Ocker, Siena im orangeroten Bereich
- Englischrot, die wichtigste blautichige rote Erde

Bedeutung und Anwendung

Warnung und Signal

Die Farbe Rot ist eine der auffälligsten Farben und dient in Kombination mit Weiß oder Schwarz als Warnfarbe. Deshalb ist das Haltesignal von Verkehrsampeln rot. Auch für Warn- und Verbotsschilder wird Rot verwendet, auch das vorgeschlagene neue Symbol für Radioaktivität setzt sich aus Rot und Schwarz zusammen, allerdings mit weißen Linien, um den ansonsten geringen Kontrast zwischen Rot und Schwarz zu verbessern.

Die Verwendung als Warnfarbe ist nicht nur auf den menschlichen Bereich beschränkt, sondern auch im Tierreich anzutreffen. Tiere tragen Rot als Warntracht, um potentielle Fressfeinde abzuschrecken. Diese Wirkung ist allerdings auf Tierarten beschränkt, die das auch wahrnehmen können. Rot am langwelligen Ende könnte auch als dunkel und wenig deutlich wahrgenommen werden.



In der Werbung wird Rot eingesetzt, um auf Produkte aufmerksam zu machen. Rote Listen sind Verzeichnisse, die eine Gefährdung oder Gefährlichkeit ihres Inhaltes ausdrücken sollen. Dazu gehören Verzeichnisse der gefährdeten Tier- und Pflanzenarten oder das Verzeichnis der gehandelten Arzneien.

Werden Fußballspieler wegen grober Unsportlichkeit vom Platz gestellt, so zieht der Schiedsrichter die Rote Karte, im Gegensatz zur gelben Karte für ein geringes Vergehen.

Psyche

Die züngelnde Flamme des Feuers ist rot, die Glut ist rot. Es bedeutet Energie und Wärme. Rot ist eine warme Farbe. Rot gilt auch als Farbe des Blutes und ist mit Leben verknüpft.

Rot steht daher für Freude und Leidenschaft und ebenfalls für Liebe und Erotik. Leidenschaft ist aber auch Aggression und Zorn, so etwa bei dem Begriff „rot sehen“ oder beim roten Tuch. Das rote Tuch beim Stierkampf ist dabei die Reizfarbe des Menschen, den farbenblinden Stier selbst stört nur der Stierkämpfer. Traditionell wird allerdings das rote Tuch als Kampfmittel gesehen. Gesteigert werden kann dieser farbpsychologische Effekt noch durch die Kombination mit Schwarz, der Farbe des Todes. Der Zusammenhang von Rot und Aggression führte in der Antike dazu, dass der rote Planet mit dem Kriegsgott Mars assoziiert wurde.

Erröten kann ein Zeichen von Scham oder Verlegenheit sein, aber auch von Zorn. Hier spielt unser seelisches System die treibende Kraft, indem es die Blutversorgung aktiviert und damit den Hautton verändert. Die Verringerung des Blutdrucks führt zum Erblassen.

Religion

Die Farbe Rot spielt in zahlreichen Religionen eine Rolle. In primitiven Gesellschaften ist Rot, die Farbe von Feuer und Blut, mit der Fähigkeit assoziiert Dämonen zu exorzieren, Krankheiten zu heilen und den Bösen Blick abzuwehren. Im Alten Ägypten war rot dem Wüstengott Seth heilig.^[2] In der jüdischen Tradition stand Rot für den Mensch, aber auch die Gottheit in Form des brennenden Busches. Leuchtendes Rot war die Farbe des Blutopfers und das Symbol für die Sünde, die mit diesem Opfer gesühnt werden sollte. Sie stand für Reichtum, Krieg und erotische Liebe.^[3]

Im Christentum ist Rot die Farbe des Heiligen Geistes und des Blutes der Märtyrer. Rot ist Gefahr und im übertragenen Sinn Sünde. Bereits im 11. Jahrhundert übernahm die römisch-katholische Kirche Rot als Farbe ihrer höchsten Würdenträger, sie wies auf die christlichen Märtyrer, die Kreuzigung und christliche Nächstenliebe hin.^[4] Rot ist (vergl. purpur) eine Farbe der Autorität, die von weltlichen Herrschern getragen wurde. Der Papst erließ 1295 eine Verfügung, dass Kardinäle rote Roben zu tragen haben.^[5] In der orthodoxen Kirche steht Rot ebenso für das Leben und die Auferstehung. In Russland etwa kann mit Rot auch Schön gemeint werden.

Im tantrischen Hinduismus, im tantrisch-buddhistischen Vajrayana, im Yoga, in der Traditionellen Chinesischen Medizin (TCM) und in einigen esoterischen Lehren werden die postulierten subtilen Energiezentren zwischen dem Körper und dem subtilen Körper des Menschen als Chakren bezeichnet. Die Farbe Rot wird mit ihrer Frequenz dabei dem ersten, dem Wurzelchakra zugeschrieben.



Der mailändische Kardinal Dionigi Tettamanzi
im Kardinalsornat

Politik



Cosimo de' Medici

Die politische Bedeutung der Farbe Rot hat sich im Verlauf der Zeit erheblich gewandelt. Das teure Purpur ist mit herrschaftlicher Machtausübung verbunden, wobei in historischer Zeit unter Purpur eine Farbskala verstanden wurde, die von einem dunklen Scharlachrot bis Violett reichte.^[6] Purpurschnecken wurden bereits von den Phöniziern zum Färben eingesetzt. Römische Magistrate und Senatoren trugen ihre Toga mit einem Purpurstreifen und auch die Toga der römischen Kaiser wurde mit Purpur gefärbt. Junge Könige trugen einen anfangs mit grünem Purpur gefärbten Mantel (*pallium*). Im Laufe der Zeit verfärbte sich der Mantel rot. So zeigt sich eine symbolische Wandlung vom unreifen zum reifen Herrscher.

Die Farbe Rot blieb im Mittelalter die Farbe der Machtausübung. Rote Farbstoffe waren nur hohen Würdenträger erlaubt und zugänglich.^[7] Im Venedig des 15. Jahrhunderts trugen auch junge, wohlhabende Adelige zunehmend Rot. Der Begriff *A modo principe* oder *wie ein Prinz* gekleidet bezeichnete jene, die sich das auffallende Rot leisten konnten.^[8] Rot war das nach außen sichtbare Zeichen von Macht und Wohlstand.

Heute wird Rot als die Farbe der Arbeiterbewegung verstanden und wird von sozialdemokratisch, sozialistisch und kommunistisch

ausgerichteten Parteien, Bewegungen und Gewerkschaften eingesetzt. In Deutschland ist es die Kennfarbe der SPD. Über die traditionellen Wurzeln der SPD und durch die Zeit der SED hindurch ist es auch die Farbe^[9] der Partei DIE LINKE. In den Medien wird dieser Partei zur Unterscheidung ein Dunkelrot, mitunter auch Violett zugeordnet.

Die Sowjetarmee nannte sich *Rote Armee*, in Tradition der farblichen Kennzeichnung der revolutionären „Roten“ im Kampf mit bürgerlich-imperialistischen „Weißen“, den Gegenspielern während der Bürgerkriege nach der Oktoberrevolution. In Anlehnung an die Rote Armee während der Kämpfe in Ruhrgebiet und Mitteldeutschland bezeichnete sich eine in Deutschland von 1970 bis 1998 tätige linksextremistische Terrororganisation als Rote-Armee-Fraktion.

Rote Kapelle war die Bezeichnung einer Widerstandsgruppe gegen die NS-Herrschaft.

Abwertend wurde Rote Socke nach der Wende für Personen genutzt, die im überkommenen Gedankengut der DDR verharren.

Nach der gewählten Farbe Rot des Äußeren werden die Antiregierungskräfte in den Unruhen in Thailand in den Jahren 2009 und 2010 als „Rothemden“ bezeichnet.



Logo der SPD



Flagge der Sowjetunion

In den USA verwendet die Republikanische Partei inoffiziell die Farbe Rot als Kennzeichnung ihrer Aktivitäten.

Corporate Identity

Rot ist aufgrund seiner Wirkung und der damit verknüpften Emotionen als Corporate Design verbreitet. Es dient Unternehmen als Wiedererkennungsmerkmal, zur Repräsentation von Marketingzielen, oder aufgrund seiner allgemeinen Wirkung im Kulturkreis.

In Umkehrung der Schweizer Flagge wurde das komplementäre Symbol des Roten Kreuzes für die internationale Organisation der humanitären Hilfe gewählt. Da das Kreuz in anderen Kulturkreisen anders belegt ist, wurde im jüdischen Kulturkreis der Rote Davidstern als humanitäre Organisation gebildet und entsprechend im islamischen Bereich der Rote Halbmond.

Rot ist aufgrund seiner ursprünglichen Farbwirkung die meist gewählte Farbe von Fußballmannschaften. Beispiele sind Manchester United (England) oder der 1. FC Kaiserslautern (Deutschland).

China

In China steht die Farbe Rot als Symbol traditionell für Freude, für Sommer und den Süden (vgl. Fünf-Elemente-Lehre). Rot bedeutet Glück und wird daher gern für Geschenkpapier, Einladungskarten und alles Festliche verwendet. Die Farbe des traditionellen Brautkleides ist rot, doch wird heute vermehrt, beeinflusst durch den Westen, auch in weiß geheiratet.

Eine weitere Bedeutung bekam Rot naturgemäß durch die Verbindung zur politischen Linken im 20. Jahrhundert mit dem Vordringen des Maoismus.

- Rote Fahne: die Flagge Chinas und daraus eine chinesische Automarke.
- Rote Garden: Jugendorganisation in der Kulturrevolution

Die Roten Khmer in Kambodscha waren extreme maoistische Kommunisten.

Kampfsport

In vielen Kampfkünsten – wie Jiu Jitsu, Judo und Karate – wird ein Gürtel (jap. Obi) als Teil der Kampfsportkleidung (jap. Keikogi) getragen. Der rote Gurt repräsentiert den Kenntnisstand des langjährigen und engagierten Budoka. Die rote Gurtfarbe repräsentiert den neunten und zehnten Meistergrad (jap. Dan) welcher ausschließlich verliehen wird und den Groß-Meistern (jap. O-Sensei) der jeweiligen Kampfdisziplin vorbehalten ist.



Die Gürtelfarben der Meistergrade im Budo.

Kartenspiel

Im Kartenspiel entspricht Rot der französischen (Spiel-)Farbe *cœur* (Herz). Das Symbol ist das Herz, wie ebenfalls im deutschen Blatt.

Rotes Licht

Das sogenannte *Rotlicht* ist eine technische Einteilung, die der Tatsache gerecht wird, dass Wärmestrahlung bereits im roten Spektralbereich beginnt und bis weit ins Infrarot reicht. Die wesentlichste Nutzung ist die Rotlichtbehandlung, eine medizinische Behandlung mit Wärmestrahlung. Durch Vorschaltung eines Rotfilters kann schon Glühlampenlicht, das zum größten Teil Wärme(strahlung) entwickelt, bei geeigneter Technik diese Wirkung erreichen.

Da das rote Licht einer „roten Laterne“ den Standort eines Bordells markiert, steht „Rotlicht“ im übertragenen Sinne. So ist ein Rotlichtviertel der Bereich einer Stadt, in dem sich Prostitution und Sexgewerbe konzentrieren oder genehmigt sind. Das Rotlichtmilieu beschreibt die soziale Umgebung eines Rotlichtviertels.

Braun ist ein dunkles Rot. Rotes Licht wirkt bei geeigneter spektraler Zusammensetzung auf die L-Zapfen, so dass auch ein etwas dunklerer Eindruck entsteht, wie das bei Barbeleuchtung gewünscht wird. So ist rotes Licht geeignet, um anregende Bräune vorzutäuschen. Das trifft für diese besondere Beleuchtung der Menschenhaut zu, wird aber werbewirksam auch bei Backwaren und Braten eingesetzt.

Heraldik

In der Heraldik (Wappenkunde) zählt Rot zu den klassischen Tinkturen, das neben den Metallen Gold und Silber als Farbe bezeichnet wird. Es stand lange Zeit für das Heilige Römische Reich deutscher Nation.

Objekte in Rot

- Rote Haare
- Rotkäppchen: eine Märchenfigur aus der Sammlung der Gebrüder Grimm
- Rote Blutkörperchen: die Zellen im Blut von Wirbeltieren, die dem Stoffwechsel von Sauerstoff und Kohlendioxid dienen
- Roter Riese: eine Sternengruppe
- Roter Teppich
- Tiere
 - Rotaugen: eine Fischart
 - Rotbarsch: zwei Fischarten: sowohl *Sebastes marinus* als *Beryx splendens* (beides keine echten Barsche)
 - Rotfeder: eine Fischart
 - Rotkehlchen: eine Vogelart
 - Rotschenkel: eine Vogelart

- Rotschwänze: eine Vogelgattung
- Rothirsch: eine Hirschart
- Rotes Riesenkänguru: eine Känguruart
- Pflanzen
 - Rote Bete oder Rote Rübe: Varietät der Runkelrübe
 - Rotholz: das Brasilholz
- Mineralien
 - Rubin: rote Varietät des Minerals Korund
- Geografische Objekte
 - Roterde: eine tropische Bodenart
 - Rotliegend (Gesteinsformation)
 - Rotes Meer: Nebenmeer des Indischen Ozeans
 - Roter Fluss: Fluss in Südostasien der auf Grund des mitgeführten Lehms eine rote Färbung hat.
 - Rotes Becken: Kern der chinesischen Provinz Sichuan
 - Roter Main: Quellfluss des Mains
 - Rotbach (Rhein): Bach in Dinslaken(Kreis Wesel)
 - Roter Sand: der Leuchtturm vor der Wesermündung

Literatur

- Amy Butler Greenfield: *A Perfect Red – Empire, Espionage and the Qest for the Color of Desire*, HarperCollins Publisher, New York 2004, ISBN 0-06-052275-5
- Katholisches Institut für Medieninformation und Katholische Filmkommission für Deutschland (Hrsg.): *film-dienst 03/02 thema Rot*. Nr. 3, KIM Katholisches Institut für Medieninformation, Köln 2002, ISSN 0720-0781 ^[8].
- Harald Küppers: *Schnellkurs Farbenlehre*. DuMont, Köln 2005. ISBN 3-8321-7640-3
- Anna Schmid, Alexander Brust (Hrsg.): *Rot. Wenn Farbe zur Täterin wird*. Museum der Kulturen Basel, Christoph Merian Verlag, Basel 2007. 240 Seiten. ISBN 978-3-85616-344-0

Weblinks

- Die Farbe Rot ^[10]
- Umfangreiche Arbeit über die Farbe Rot im Allgemeinen (physikalisch und biologisch) und ihre Wirkung ^[3]
- Über das Wesen der Farbe Rot – Eine Zusammenfassung mit Literaturangaben ^[11]
- Farbe des Monats – Assoziationen zur Farbe Rot ^[12]
- Manfred Spitzer: *Die Farbe Rot* ^[13]. RealVideo aus der BR-alpha-Reihe „Geist und Gehirn“ (ca. 15 Minuten)

Einzelnachweise

- [1] Greenfield, S. 3
- [2] Greenfield, S. 2
- [3] Greenfield, S. 19
- [4] Greenfield, S. 22
- [5] Greenfield, S. 22
- [6] Greenfield, S. 20
- [7] Greenfield, S. 23
- [8] Greenfield, S. 25
- [9] Parteiseite (<http://www.die-linke.de/>)
- [10] <http://www.seilnacht.tuttlingen.com/Lexikon/Rot.htm>
- [11] <http://www.janiesch-farbenplanung.de/farberot.html>
- [12] <http://farbedesmonats.de/rot>
- [13] http://www.br-online.de/cgi-bin/ravi?verzeichnis=alpha/geistundgehirn/v/&file=spitzer_48.rm&g2=1



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

bjn:Habang

Schwarz

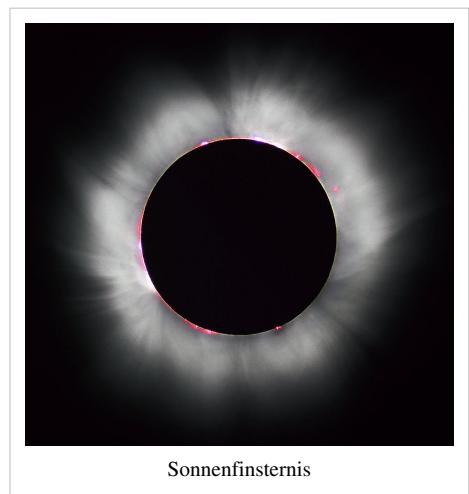
Schwarz

Schwarz ist die Bezeichnung für eine Farbempfindung, welche beim Fehlen eines Farbreizes entsteht, also wenn die Netzhaut ganz oder nur teilweise keine Lichtwellen im sichtbaren Spektrum rezipiert. Das zugehörige Substantiv ist **Schwärze**. Schwarz gehört zu den unbunten Farben.

Etymologie

Für die Abwesenheit von Licht gibt es mehrere unterschiedliche Wurzeln im indoeuropäischen Sprachstamm: *black* (en), *noire* (fr), *zwart* (nl).

Durch die mehrdeutige Nutzung des Begriffs Farbe entsteht die Unklarheit, ob Schwarz eine Farbe ist. Im Sinne von Fehlen von Licht ist Schwarz im Alltag keine Farbe. In der Fachterminologie wird allerdings streng zwischen Farbmittel und Farbreiz unterschieden, dadurch erklärt sich die Bezeichnung von schwarz als *unbunte* Farbe, da ihm die Farbigkeit, die Buntheit fehlt.



Farbenlehre

Schwarz ist als Sinneswahrnehmung eine Farbqualität. Physikalisch bedeutet Schwarz Abwesenheit von (sichtbarem) Licht jeglicher Wellenlänge. Farbe bedeutet hier Farbreiz. Fehlt jeglicher Farbreiz, wird schwarz wahrgenommen.

Schwarze Körper

Ein Gegenstand erscheint schwarz, wenn er Licht aller sichtbaren Wellenlängen vollständig absorbiert.^[1] Farbe ist eine Sinnesempfindung, Schwarz ist als Farbe kategorisiert, die im Vergleich zur Umgebung eine minimale Lichtmenge reflektiert oder (fast) kein Licht abstrahlt.

Die unbunte Farbe **Schwarz** ergibt sich in der subtraktiven Farbmischung durch Mischung der Farben Cyan, Magenta und Gelb nach CMYK im Verhältnis {100,100,100,0} oder {0,0,0,100}.

Schwarz hat im RAL-Farbsystem die Bezeichnungen RAL 9005 und wird mit Farbmitteln erreicht, die maximal absorbieren, meist durch Ruß, aber auch durch Ausfärbungen mit Anilinschwarz.

Der Schwarzstandard in der Farbmessung wird durch ein Loch in einem (ideal) matt ausgekleideten Hohlkörper repräsentiert. Ziel dieser Apparatur ist es, dass sich ein einfallender Lichtstrahl (aus dem Umgebungslicht) im Inneren „totläuft“. Dadurch treten an der Austrittsöffnung keine Photonen und somit kein Licht mehr aus.

Die Definition für Farbe nach DIN schließt die sonstigen visuellen Effekte, wie Glanz oder Struktur, aus. Eine glänzende schwarze Oberfläche kann durchaus reichlich Licht reflektieren. Messtechnisch ist der Glanz bei der Bestimmung von Farben auszuschließen, so erreicht man (physikalisch) ein „schwärzeres“ Schwarz. „[Farbe ist ...] diejenige Gesichtsempfindung eines dem Auge des Menschen strukturlos erscheinenden Teiles des Gesichtsfeldes, durch die sich dieser Teil bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge von einem gleichzeitig gesehenen, ebenfalls strukturlosen angrenzenden Bezirk allein unterscheiden kann.“ (Definition nach DIN 5033)

In diesem Sinne wurde das (derzeit) tiefste, also „schwärzeste“ Schwarz von Pulickel Ajayan an der Rice University in Houston gemessen.^[2] Hierbei bestand die raue Oberfläche aus einem „Teppich“ von Nanoröhrchen aus Kohlenstoff. Deren Durchmesser betrug nur das 400stel eines menschlichen Haares. Tiefschwarz ist diese Oberfläche weil nur 0,045 % des Lichtes im sichtbaren Bereich remittiert (zurückgeworfen) werden. Zuvor galt eine Substanzoberfläche aus Nickel und Phosphor vom National Physical Laboratory in London mit einem Remissionsgrad von 0,18 % als tiefstes Schwarz.



Lichtfarbe (fehlendes Licht)

Bei Fernsehgeräten und Computermonitoren ergibt sich ›Schwarz‹ aus dem Fehlen jeglicher Intensitäten der Farbreiz erzeugenden „Leuchtpunkte“ Rot, Grün und Blau (Additive Farbmischung). ›Schwarz‹ hat im RGB-Farbraum den Wert RGB = (0, 0, 0) bei 8-bit-dezimal-Darstellung oder RGB = (00 00 00) bei hexadezimaler Darstellung.

Für herkömmliche Monitore entspricht die jeweilige Materialfarbe der Bildschirmoberfläche im ausgeschalteten bzw. lokal nicht angesteuerten Zustand dem schwärzesten darstellbaren Wert und ist meist nur ein dunkles Grau. Grund ist das reflektierte Umgebungslicht.

Durch spezielle Oberflächenbeschichtungen ist es im Labor gelungen, den Reflexionsgrad von Materialien auf 0,045 Prozent zu senken.^[3]

Farbmittel

Die Herstellung schwarzer Pigmente ist in der Malerei mindestens seit dem 1. Jahrhundert nachgewiesen. Dabei wurde *Pflanzenschwarz*, das aus Trester gewonnen wurde oder Elfenbeinschwarz (gebranntes Elfenbein), eingesetzt.

Die Schwarzfärberei von Stoffen war eine besondere handwerkliche Kunst, die Schwarzfärberei hatte meist eine eigene Zunft. In den Listen finden sich ausführliche Zuordnungen und Angaben zu schwarzen Farbstoffen und schwarzen Pigmente.

Im engeren Sinn der „Farbe“ kommt die Nutzung in den Begriffen Schwarzerde und Schwarze Sonne vor.

Das wichtigste schwarze Pigment ist Ruß, der Farbton reicht dabei je nach Korngröße von Tiefbraun bis Schwarz.

Kulturelle Bedeutung

Tod

Schwarz ist im westlichen Kulturkreis die Farbe des Todes. Sie steht für das Böse und für Bedrohung, auch für Trauer. Es steht darüber hinaus für Asche und Bosheit.

Macht

Hinwiederum steht Schwarz für Individualität und Eigenständigkeit. Dunkelheit, Leere, Pessimismus und Unglück. Schwarz markiert Seriosität, auch Machtanspruch.

Im Sinne von Exklusivität steht Schwarz in der Philosophie für den Existenzialismus und bindet hierbei an die Strömungen vom Ende des 19. Jahrhunderts bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts. Diese Auslegung ergibt sich aus der Symbolik der Verdrängung.

Politik

Als politische und gesellschaftliche Symbolfarbe steht Schwarz in der christlichen Welt geprägt durch die ehemaligen Priestergewänder für den Katholizismus, später für die Reformation und im weiteren auch für Anarchismus.

In Deutschland wird schwarz mit den Parteien CDU und CSU, im deutschsprachigen Raum allgemein mit konservativen politischen Parteien assoziiert. In den USA werden dagegen die konservativen Republikaner mit Rot identifiziert. Die Farbbezeichnung wurde zur Bezeichnung der schwarz-gelben Koalition genutzt.



Schwarze Kleidung

In Italien stand Schwarz vor und während des Zweiten Weltkrieges für eine faschistische Gesinnung (→ Schwarzhemden). In Deutschland waren die SS-Uniformen schwarz als Zeichen der Exklusivität, im Gegensatz zum Braun der Massenbreite in der SA.

Religion

Die exklusive Besonderheit findet sich in religiöser Symbolik, wie dies für Schwarze Madonna oder die Göttin Kali zutrifft.

Schwarz ist im Katholizismus die liturgische Trauerfarbe.

Kampfsport

In vielen Kampfkünsten – wie Jiu Jitsu, Judo, Taekwondo und Karate – wird ein Gürtel (jap. Obi) als Teil der Kampfsportkleidung (jap. Keikogi) getragen. Der schwarze Gurt repräsentiert den Kenntnisstand des Budoka und wird nach Bestehen der ersten Meisterprüfung, der so genannten Dan-Prüfung, verliehen und getragen. Die Person wird dann auch Danträger genannt und kennzeichnet einen *Meister* (jap. Sensei) der jeweiligen Kampfsportart.



Die Gürtelfarben der Meistergrade im Budo.

Verbot

Im übertragenen Sinne für 'verboten' und 'unerlaubt' wird es bei unerlaubtem Handel, Schwarzarbeit oder Schwarzfahren gesetzt.

China

Im chinesischen Kulturkreis ist Schwarz Symbol für Dunkelheit, Ehre, Tod, Winter und Norden (Fünf-Elemente-Lehre). Im Maoismus repräsentierte sie im Gegensatz zum systemimmanenten Rot die Konterrevolution.

Gothic-Szene

Schwarz ist Symbolfarbe der Gothic-Szene für Kleidung und Outfit.^[4] Sie ist Ausdruck von Ernsthaftigkeit, Dunkelheit und Mystik, aber auch für Hoffnungslosigkeit und Leere, Melancholie, und hier für den Bezug zu Trauer und Tod.

Metal-Szene

Genau wie in der Gothic Szene ist Schwarz in der Metal Szene Symbolfarbe für die Kleidung. Schwarz ist in den extremeren Spielarten und seiner Subszene (Blackmetal/Deathmetal) neben schwarzen Tarnmustern die normale Farbe nicht nur für Kleidung sondern auch für alltags Gegenstände (Rucksack, Zelt,...). Hier aber nicht im Sinne von Hoffnungslosigkeit und Leere sondern als Zeichen von Macht und Stärke was meist durch Ranger Boots (Springerstiefel) unterstrichen wird. Auch hier ist sie Farbe für den Tod, dieser wird aber eher positiv gewertet.

Heraldik

In der Heraldik zählt Schwarz („Sable“) zu den klassischen Tinkturen und wird, im Gegensatz zu den Metallen Gold und Silber, als Farbe bezeichnet. In älteren heraldischen Werken wird die Farbe als *Kohlfarbe* bezeichnet.^[5]

Literatur

- Harald Haarmann: *Schwarz. Eine kleine Kulturgeschichte*. Lang, Frankfurt am Main 2005, ISBN 3-631-54188-0.

Weblinks

- Farbpulse: *Schwarz, die Farbe der Leere, der Trauer und des Nichts*^[6]. 19. Juli 2006.

Einzelnachweise

- [1] Subtraktive Farbmischung (<http://lehrerfortbildung-bw.de/kompetenzen/gestaltung/farbe/physik/subtrakt/>)
- [2] *Forscher kreieren das schwärzeste Schwarz aller Zeiten* (<http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/0,1518,528990,00.html>) Spiegel Online vom 17. Januar 2008
- [3] Zeit Online Das totale Schwarz (<http://www.zeit.de/2010/15/farbe-schwarz-forschung>)
- [4] Doris Schmidt, Heinz Janalik: *Grufties. Jugendkultur in Schwarz*. Schneider, Baltmannsweiler 2000, ISBN 3-89676-342-3, S. 40
- [5] Gert Oswald: *Lexikon Heraldik*. Bibliographische Institut, Leipzig 1984.
- [6] <http://www.farbimpulse.de/farbwirkung/detail/0/41.html>



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

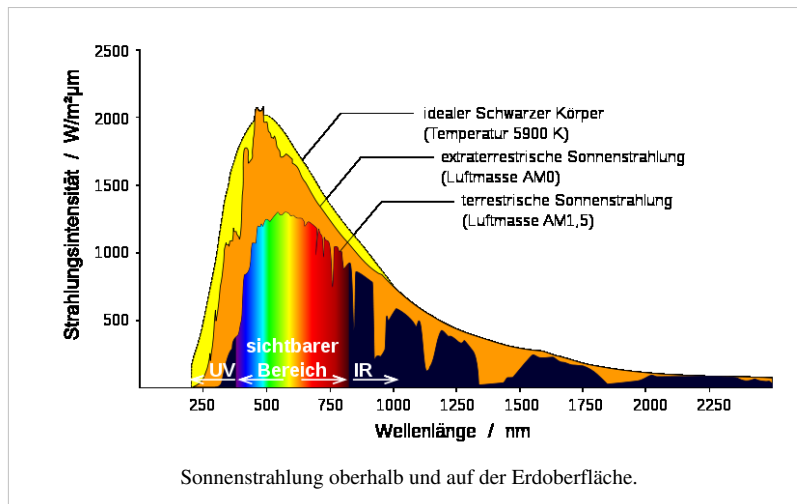
hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

bjn:Hirang

Sonnenstrahlung

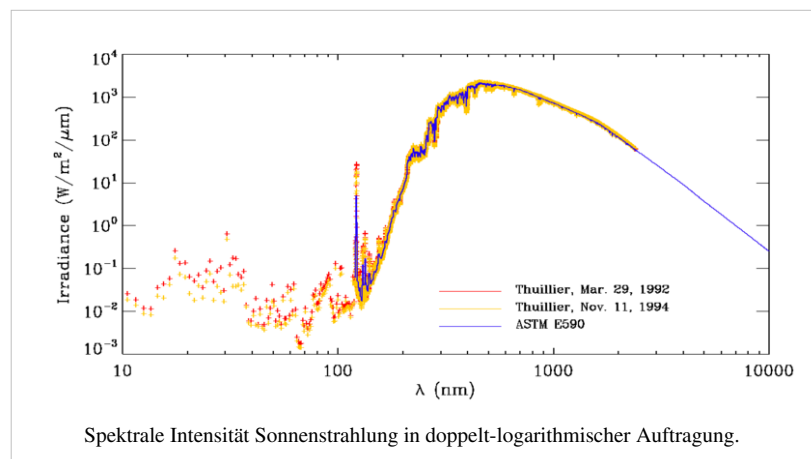
Sonnenstrahlung oder **Solarstrahlung** ist die von der Sonne ausgesandte Strahlung. Das elektromagnetische Spektrum der Sonne hat die größte Intensität im Bereich des sichtbaren Lichts. Neben der elektromagnetischen Strahlung emittiert die Sonne auch Teilchenstrahlung, diese besteht aus den geladenen Teilchen des Sonnenwinds und den Neutrinos, die bei der Kernfusion im Innern der Sonne entstehen. In den meisten Zusammenhängen ist mit der Sonnenstrahlung allerdings nicht diese Teilchenstrahlung (mit-)gemeint.

Abhängig von der Wellenlänge wird die Sonnenstrahlung von der Atmosphäre mehr oder weniger stark absorbiert. Die an der Erdoberfläche eintreffende Intensität hängt zudem stark vom Wetter und vom Sonnenstand ab.



Sonnenspektrum

Die elektromagnetische Strahlung der Sonne hat ihr Maximum bei 500 nm Wellenlänge (blau-grünes Licht), reicht aber von harter Röntgenstrahlung mit weniger als 0,1 nm bis zu langen Radiowellen. Das Spektrum ist von etwa 140 nm (UVC) bis etwa 10 cm (Mikrowelle) das eines Schwarzen Strahlers bei einer Temperatur von knapp 6000 K, der Temperatur der Photosphäre.



Im Bereich von naher Infrarotstrahlung

(NIR) bis ins UV enthält das Spektrum eine Vielzahl von Absorptionslinien, die sogenannten Fraunhoferlinien. Sie entstehen durch Strahlungsabsorption in der Chromosphäre der Sonne.

Sonneneruptionen, deren Häufigkeit von der Sonnenaktivität abhängen, erhöhen die Strahlung im Röntgenbereich kurzfristig um mehrere Größenordnungen, tragen aber nur wenig zur Gesamtstrahlung bei. Oft werden sie von langwelliger Radiostrahlung begleitet (engl. Radio bursts), die abhängig vom Intensitätsverlauf als *Typ I* bis *Typ V* kategorisiert wird.

Radiostrahlung

Die ruhige Sonne strahlt im gesamten Radiofenster. Dort ist ihr Spektrum nicht mehr das eines schwarzen Körpers, sondern die effektive Temperatur steigt von ca. 6000 K bei 1 cm Wellenlänge auf 1.000.000 K bei 10 m an. Ebenfalls mit der Wellenlänge wächst der scheinbare Durchmesser der Sonne, die Strahlung wird zunehmend von der äußeren Atmosphäre dominiert. Es handelt sich um Synchrotronstrahlung schneller Elektronen, die um Magnetfeldlinien spiralen. Die wichtigsten Strahlungsanteile einer gestörten Sonne sind:

- Langsame Strahlungsänderung proportional zur Sonnenfleckenzahl, s.a. Solarer Radioflussindex.
- Rauschstürme (engl. Noise storms) oberhalb 100 MHz, Dauer mehrere Tage.
- Strahlungsausbrüche (engl. Radio bursts) in Verbindung mit Flares und CME, Dauer Sekunden bis Tage. Sie werden unterteilt in Kategorien I bis V.

Solarkonstante

Hauptartikel: Solarkonstante

Die gesamte elektromagnetische Strahlungsleistung der Sonne wird durch die thermische Strahlung der Photosphäre dominiert, die um weniger als 0,1 % schwankt. Die auf die Erde fallende Leistung schwankt wegen der Exzentrizität der Erdbahn im Jahreslauf um knapp 7 %. Die mittlere Leistung pro Fläche wird Solarkonstante genannt. Sie beträgt

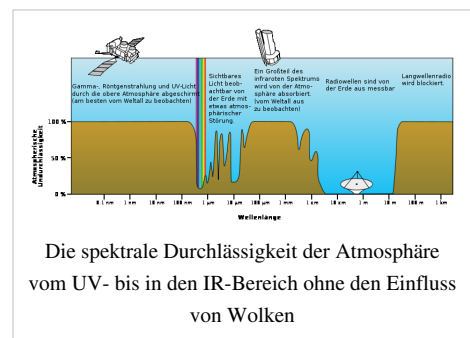
$$E_0 = 1,367 \text{ kW/m}^2.$$

Die bei der Kernfusion im Innern der Sonne entstehenden Neutrinos tragen 2 % der Fusionsleistung fort.

Dämpfung durch die Atmosphäre

Die Intensität der Sonnenstrahlung ist am Boden geringer als außerhalb der Atmosphäre, deren Absorption und Streuung stark wellenlängenabhängig ist: Der knapp die Hälfte der solaren Strahlung ausmachende visuelle Anteil erreicht bei klarem Wetter und hohem Sonnenstand zum größten Teil die Erdoberfläche. Die nicht sichtbare Strahlung ist ganz überwiegend nahe Infrarotstrahlung (NIR), von der etwa ein Viertel in der Atmosphäre absorbiert wird, hauptsächlich durch Wassermoleküle. Von der Ultraviolettstrahlung, welche weniger als 10% der Strahlung ausmacht, dringt UVA weitgehend durch, hauptsächlich geschwächt durch Rayleigh-Streuung, die auch dafür verantwortlich ist, dass der Himmel blau ist und man im Halbschatten braun wird. UVB wird von der Ozonschicht stark absorbiert, UVC von Luftsaurestoff.

Die genaue Berechnung des Strahlungsflusses in Abhängigkeit von Sonnenstand und Höhe über dem Meeresspiegel ist schwierig. Näherungsweise berücksichtigt man lediglich die zu durchdringende Schichtdicke der Atmosphäre in *Air Mass*-Einheiten (Luftmasse) und die Sonnenscheindauer. Wolken vermindern die Direktstrahlung, Dunst erhöht die Diffusstrahlung. Diffusstrahlung und Direktstrahlung an einem Ort ergeben zusammen die Globalstrahlung.

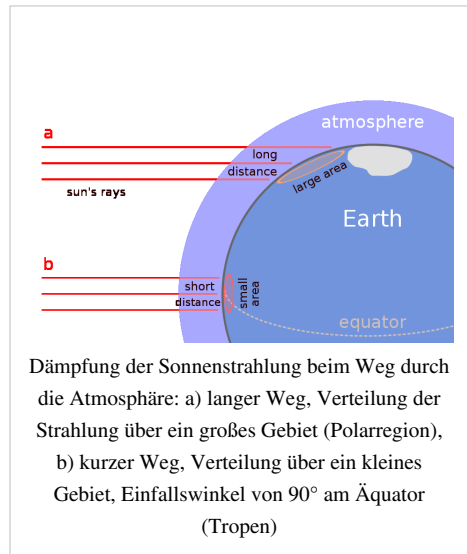


Bestrahlungsstärke

Fällt die Sonnenstrahlung schräg ein, verteilt sie sich über eine größere Erdoberfläche, die Bestrahlungsstärke sinkt. Dieser Effekt verläuft mit dem Sinus des Höhenwinkels. Der Einfluss der Jahreszeiten in den Tropen ist kaum merklich, da der Sonnenstand dort um Mittag immer steil ist. Der Unterschied zwischen Sommer und Winter wirkt zu den Polen hin immer stärker.

In Mitteleuropa steht die Mittagssonne sommers 60° bis 65° hoch und strahlt bei idealen Wetterbedingungen mit einer Bestrahlungsstärke von etwa 700 Watt/m^2 . Im Winter sind es nur 13° bis 18° und selbst zu Mittag nur etwa 247 Watt/m^2 . Im Vergleich dazu beträgt die Strahlung auf 3-4 km hohen Bergen etwa 1000 W/m^2 .

Die Erwärmung der Erdoberfläche hängt von der Dauer des hellen Tages ab. Ende Juni beträgt die Dauer in Mitteleuropa etwa 16 Stunden, im Dezember acht Stunden. Das Verhältnis der gesamten eingestrahnten Sonnenenergie beträgt zwischen diesen Monaten bei etwa 5:1 bis 10:1, wird aber durch Wärmespeicherung vor allem durch die Meere gemildert (*Seeklima*).



Messung

Die Messung der Sonnenstrahlung erfolgt über Pyranometer, Pyrheliometer oder Sonnenscheinautographen. Letztere werden vor allem zur Bestimmung der Sonnenscheindauer benutzt. Die Solarkonstante wird hingegen über Radiometer gemessen.

Strahlungsbilanz

Hauptartikel: Strahlungshaushalt der Erde

Die Temperatur der Erdoberfläche wird global von der Strahlungsbilanz, dem Strahlungshaushalt bestimmt, damit wird das Zusammenwirken von Absorption und Reflexion sowie Re-Emission und Streuung erfasst.

Siehe auch

- Strahlungsdruck der Solarstrahlung
- Strahlenbüschel
- Solarenergie

Weblinks

- Detailliertes Sonnenspektrum ^[1] bei Astronomy Picture of the Day vom 27. Juni 2010

Referenzen

[1] <http://www.starobserver.org/ap100627.html>

Spektralfarbe

Die Spektralfarben des Lichtes

Farbe	Wellenlänge	Frequenz
rot	~ 700–630 nm	~ 430–480 THz
orange	~ 630–590 nm	~ 480–510 THz
gelb	~ 590–560 nm	~ 510–540 THz
grün	~ 560–490 nm	~ 540–610 THz
blau	~ 490–450 nm	~ 610–670 THz
violett	~ 450–400 nm	~ 670–750 THz

Eine **Spektralfarbe** ist jener Farbeindruck, der durch *monochromatisches Licht* im sichtbaren Teil des Lichtspektrums entsteht. Sie ist in jedem Farbton die intensivste, mithin **reine Farbe**.

Spektrum

Das Spektrum (als Begriff der Farblehre) ist die Gesamtheit aller Linien und Banden bestimmter Frequenz. „Weißes Licht“ ist im physikalischen Sinne (und praktisch kaum realisierbar) ein aus Anteilen aller Wellenlängen des sichtbaren Spektralbereichs energiegleich gemischtes Licht. Meist versteht man darunter Tageslicht (Sonnenlicht) sowie die Normlichtarten mit ihren unterschiedlichen Farbtemperaturen. Die von einer energiegleichen Lichtquelle erzeugte Farbpmpfindung heißt exakterweise „*unbunt*“.

Durch Brechung am optischen Prisma, durch Beugung an Gittern oder in Interferenz gelingt es, „weißes Licht“ in Spektralfarben zu zerlegen. Spektralfarben als monochromatisches Licht können bei geeigneten Emissionsvorgängen auch direkt entstehen (Natriumdampflampe, Laser). Newton stellte diesen Sachverhalt in seinen *Opticks* dar, nach ihm sind es die sieben Spektralfarben: Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett. Für Goethe dagegen war das „weiße Licht“ das Ursächliche.

Eine besondere Bedeutung kommt der „weißen Strahlung“, also der energiegleichen Strahlung in der Photometrie und verwandten Gebieten zu. Hier ist es wichtig in den notwendigen (betrachteten) Wellenlängenintervallen diese Eigenschaft zu erreichen. Für die Messung der Augenempfindlichkeitskurve ist neben der energiegleichen Strahlung sogar eine quantenintensitätsgleiche Strahlung erforderlich. Solche Messungen dienen der Ableitung von Normspektralfarbwerten.



Prisma: Zerlegung von „weißem Licht“ in Spektralfarben

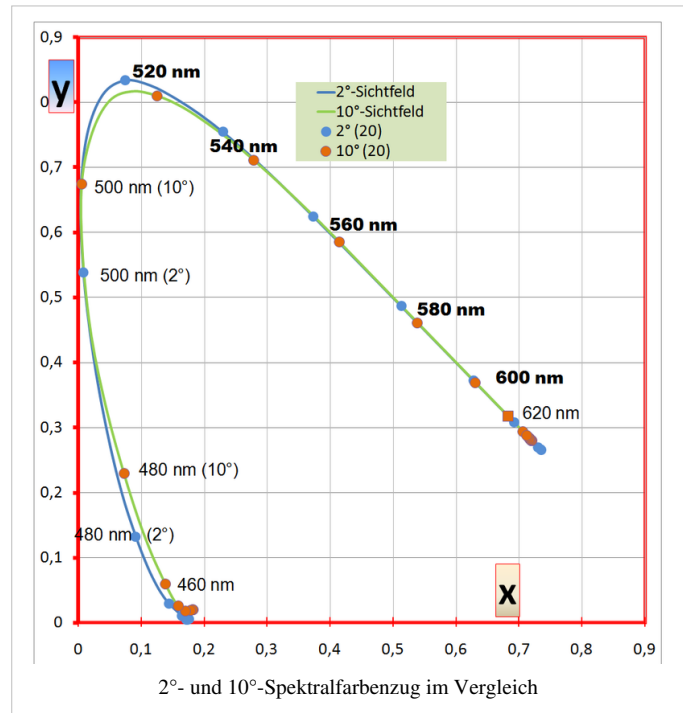


Zerlegung von „weißem Licht“ in Spektralfarben an gebrochenem Eis

Farbmetrik

Um einen dreidimensionalen Farbraum darstellen zu können, ist der Farbreiz des Wellenlängenspektrums auf die drei (farbsensitiven) Zapfentypen-Sensorentypen abzubilden. Dafür ist ein geeignetes System von Farbvalenzen, den Grundfarben für die Rot-, Grün-, Blauempfindlichkeiten aufzustellen. Die Rechenvorschrift dafür ist mit dem Tristimulusalgorithmus seit 1931 genormt. Notwendige Parameter wurden in späteren Untersuchungen präzisiert und im Prinzip bestätigt. Das Ergebnis in der grafischen Darstellung ist die „Schuhsohlenkurve“ der *Normfarbtafel*, das sogenannte Chromatizitätsdiagramm.

Die Spektralfarben liegen auf dem Umfang dieser Fläche. Die Spektralfarben sind also die gesättigsten Farben der jeweiligen dominanten Wellenlänge.

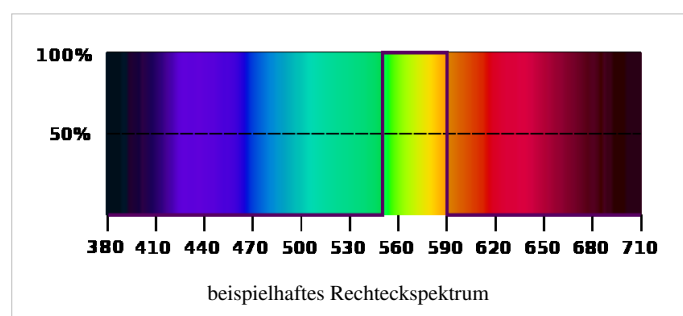


Eine Abhängigkeit der Farbkoordinaten von der Wahrnehmung ergibt sich durch die unterschiedliche Lage des Spektralkurvenzuges, je nachdem ob das 2°-Sichtfeld oder ein 10°-Sichtfeld benutzt wird. Innerhalb des 2°-Feldes wird auf die Netzhautfläche des „besten Farbsehens“ abgebildet, in der Netzhaut stehen die Zapfen hier am dichtesten beieinander. Im 10°-Sichtfeld nimmt die Dichte der Zapfen schon ab und es tritt die Empfindung der Stäbchen hinzu. Dieses Sichtfeld entspricht einer A4-Fläche im normalen Sehabstand.

Farbwahrnehmung

Die Zapfenzellen in der menschlichen Netzhaut (sowie auch anderer Lebewesen) besitzen je nach Typ unterschiedliche Empfindlichkeitsspektren, die bestimmte Bereiche des empfangenen Lichtspektrums abdecken. Die Verarbeitung der von den Zapfen stammenden Signale wandelt das empfangene Licht der verschiedenen Spektralbereich und Intensität in wahrgenommene Farben um. Da die Gewichtung der Spektralanteile von den Wahrnehmungsbereichen der Zapfentypen abhängt, ist auch die Farbwahrnehmung direkt davon abhängig. Wird etwa von LEDs ein nahezu monochromatisches Licht dargeboten, so wird diese Lichtfarbe als sehr rein (gesättigt) und hell wahrgenommen, also als Spektralfarbe. Im Falle des menschlichen Sehens gibt es kein Lichtspektrum, das nur einen einzigen Zapfentyp reizt. Da sich die Bereiche der Zapfentypen überschneiden, werden immer mehrere Typen gleichzeitig angesprochen.

Der Spektralfarbenzug nach CIE wird in der Normfarbtafel mit der Purpurgeraden ergänzt, die allerdings Mischfarben enthält. Physikalisch gibt es für Purpurtöne keine zugehörigen Spektralfarben. Diese werden nur bei gemischter Wahrnehmung von kurz- und langwelligen Licht gesehen. Im CIE-Diagramm entspricht den Purpurtönen mit höchster Sättigung diese Purpurgerade. Prinzipiell sind alle nicht spektralen Farben Mischfarben.



Die menschliche Farbwahrnehmung bei Tagessehen (Photopisches Sehen) ist auf drei Rezeptortypen für kurze, mittlere und lange Wellenlängen begrenzt. Manche Tiere, vor allem Vögel, wie die Tauben, besitzen vier Farbrezeptoren. Dadurch können sie mehr Farbvarianten und Farbarten als ein Mensch unterscheiden. Andere Tierarten, wie Hunde, besitzen nur zwei Typen von Farbrezeptoren. Das führt zu einem kleineren Umfang an unterscheidbaren Farbtönen.

Am langwelligen roten Ende des sichtbaren Spektrums grenzt der Bereich des unsichtbaren infraroten Lichtes an. Durch den stetigen Übergang in der Empfindlichkeit auf reizende Wellenlängen ist diese Grenze fließend (zwischen 720 nm und 830 nm) und unterliegt individuellen Schwankungen. Dies wird im Wesentlichen durch den chemischen Aufbau des Rhodopsins (Sehpurpur) bestimmt. Der wahrgenommene Farbton ändert sich ab 650 nm nur geringfügig. Der infrarote Bereich des Spektrums wird als Wärmestrahlung bezeichnet, obwohl jede absorbierte elektromagnetische Strahlung ihr Energieäquivalent als Wärme erzeugt, egal ob es sich um längstwellige Radiostrahlung oder um harte (sehr kurzwellige) Gammastrahlung handelt. Die Wärmewirkung von Infrarot- und Radiostrahlung wird von Menschen direkt durch andere Rezeptoren wahrgenommen. Die Eindringtiefe der Strahlung wiederum ist wellenlängenabhängig. Nahe Infrarotstrahlung dringt nur wenige Millimeter in den Körper ein, Radiostrahlung wird im gesamten Körper umgesetzt. Dieser Effekt wird bei der Kurzwellenbestrahlung genutzt, um innere Organe zu erwärmen.

Am kurzwelligen violetten Ende des sichtbaren Spektrums, bei Wellenlängen ab etwa 380 nm und kleiner, grenzt der Bereich des ultravioletten Lichtes an. Diese Wellenlängen rufen keine Reizung der menschlichen Rezeptoren hervor, deshalb ist ultraviolettes Licht unsichtbar. Aus dem gleichen Grund wie am infraroten Ende des Lichtspektrums ist die Sichtbarkeit der Strahlung zwischen 360 nm und 410 nm individuell und altersbedingt Schwankungen unterlegen, noch stärker als im infrarot-nahen Bereich. Die Pigmentierung der Hornhaut spielt hier eine große Rolle. Außerdem verfärbt sich mit zunehmendem Alter die Linse gelblich, wodurch kurzwelliges Licht stärker gefiltert wird.

Bei Operationen am grauen Star ist nach Entfernung der getrübbten Linse die Filterwirkung beseitigt (aphakisches Sehen), was zu einer ausgeprägten Verbesserung der Wahrnehmung kurzer Wellenlängen führt. Nach Einsetzen der Kunststofflinse ist dieser besondere Effekt wieder aufgehoben.

Weblinks

- John Walker: *Color rendering of Spectra* (en) ^[1].



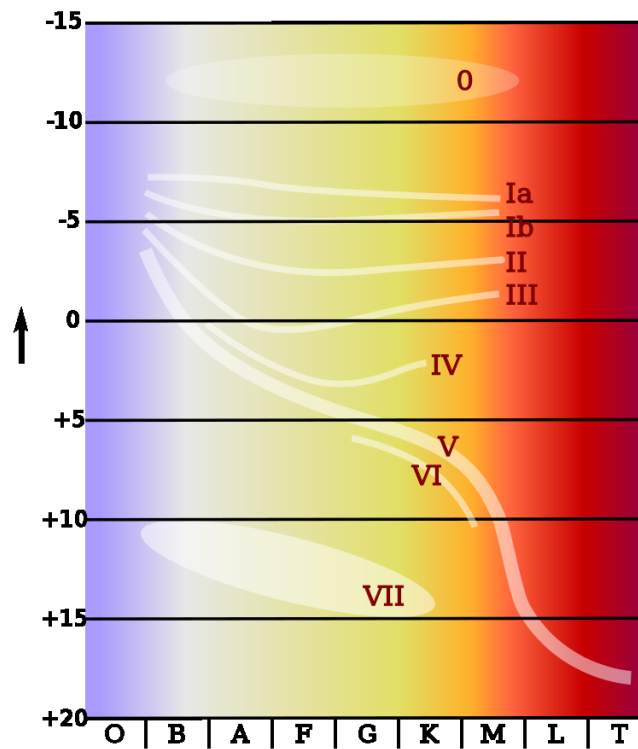
Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Referenzen

- [1] <http://www.fourmilab.ch/documents/specrend/>

Spektralklasse



Hertzsprung-Russell-Diagramm

Spektralklasse

Weißer Zwerge

Unterzwerge

Zwerge

Hauptreihe

Unterriesen

Riesen

Helle Riesen

Überriesen

Hyperriesen

Absolute

Hellig-

keit

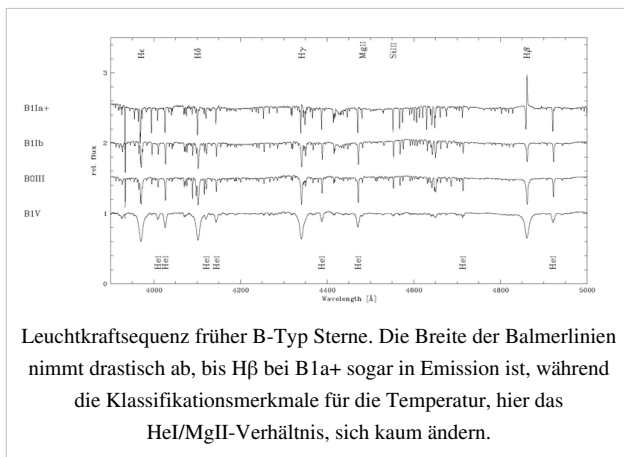
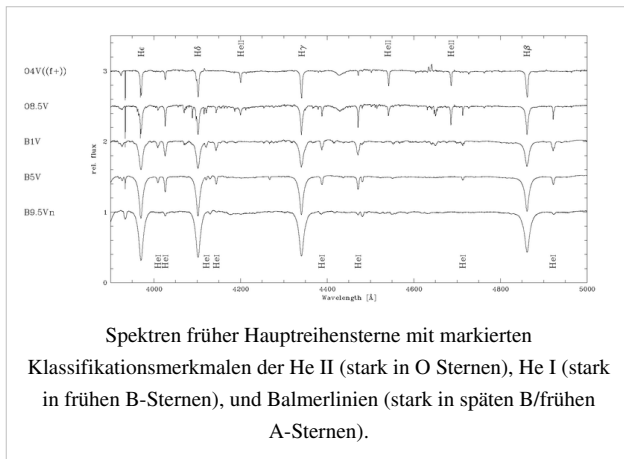
(mag)

Die **Spektralklasse**, auch *Spektraltyp* genannt, ist in der Astronomie eine Klassifikation der Sterne nach dem Aussehen ihres Lichtspektrums.

Dabei beruht das System auf der Entdeckung von Joseph von Fraunhofer im Jahr 1813, der im Sonnenspektrum dunkle Absorptionslinien fand. Robert Wilhelm Bunsen und Gustav Robert Kirchhoff entdeckten 1859, dass diese Linien von der Lage her identisch sind mit Emissionslinien, die von bestimmten chemischen Elementen abgegeben werden.

Der Schluss lag nahe, dass diese Elemente in der Sonne vorhanden sein mussten. Die Spektralanalyse war begründet. Neben der Analyse von Materialien auf der Erde ließen sich so auch die Sternspektren analysieren.

Prinzip der Spektralklassifikation



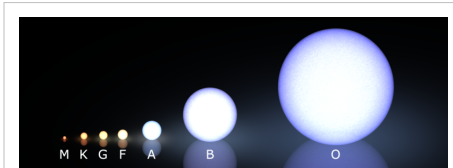
Spektralklassen des MK-Systems (nach William Wilson Morgan und Philip C. Keenan) werden durch den visuellen Vergleich der Sternspektren mit Spektren von Standardsternen bestimmt. Um instrumentelle Effekte auf die Klassifikation, wie zum Beispiel ein höheres spektrales Auflösungsvermögen, auszuschließen, wurde auch eine Standardinstrumentation angegeben. Da die Entwicklung der astronomischen Instrumente seit dem ursprünglichen MK-System jedoch weit fortgeschritten ist, wurde die Klassifikationsauflösung seither mehrfach erhöht. Neue Standardsterne wurden in das System mit einbezogen, und andere, die als wenig geeignet erkannt wurden, aus dem System entfernt. Der spektrale Bereich, auf den sich die MK-Klassifikation bezieht, reicht von etwa 390 bis etwa 500nm, bedingt durch die im ursprünglichen System verwendeten photographischen Emulsionen.

Die MK-Klassifikation beinhaltet ausdrücklich keine Klassifikation nach sekundär bestimmten physikalischen Größen, sondern macht sich die Fähigkeit des menschlichen Gehirns zur Mustererkennung zu Nutze. In neuerer Zeit wurden allerdings neuronale Netze mit einigem Erfolg auf die

MK-Klassifikation trainiert. Dadurch wird gewährleistet, dass die Klassifikation konsistent bleibt, auch wenn sich die Erkenntnisse zur stellaren Physik ändern.

Einteilung

Es hat sich eingebürgert, die Spektralklassen O bis A als **frühe Spektralklassen**, die Spektralklassen F bis G als **mittlere Spektralklassen** und die übrigen Spektralklassen als **späte Spektralklassen** zu bezeichnen. Die Bezeichnungen früh, mittel und spät entstammen der inzwischen überholten Annahme, die Spektralklasse sage etwas über den Entwicklungsstand eines Sterns aus. Trotz dieser irrtümlichen Einteilung sind diese Bezeichnungen noch heute in Gebrauch, und ein Stern gilt als früher oder später, wenn seine Spektralklasse im Vergleich zu der eines anderen näher an der Klasse O oder an der Klasse M liegt.



Schematischer Vergleich der Spektralklassen O-M für Hauptreihensterne

Es bestehen folgende sieben Grundklassen, sowie zwei Klassen für Braune Zwerge und drei Unterklassen für durch die Nukleosynthese verursachten chemischen Besonderheiten roter Riesensterne:

Klasse	Charakteristik	Farbe	Temperatur in K	Masse in M_{\odot}	Beispielsterne
O	Ionisiertes Helium (He II)	blau	30000–50000	60	Mintaka (δ Ori), Naos (ζ Pup)
B	Neutrales Helium (He I) Balmer-Serie Wasserstoff	blau-weiß	10000–28000	18	Rigel, Spica
A	Wasserstoff, Calcium (Ca II)	weiß (leicht bläulich)	7500–9750	3,2	Wega, Sirius
F	Calcium (Ca II), Auftreten von Metallen	weiß-gelb	6000–7350	1,7	Prokyon, Canopus
G	Calcium (Ca II), Eisen und andere Metalle	gelb	5000–5900	1,1	Capella, Sonne
K	Starke Metalllinien, später Titan(IV)-oxid	orange	3500–4850	0,8	Arcturus, Aldebaran
M	Titanoxid	rot-orange	2000–3350	0,3	Beteigeuze, Antares, Kapteyns Stern
Braune Zwerge					
L		rot	1300–2000		VW Hyi
T		rot (Maximum in Infrarot)	800–1300		ϵ Ind Ba
Kohlenstoffklassen der roten Riesen					
R	Cyan (CN), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenstoff	rot-orange	3500–5400		S Cam, RU Vir
S	Zirkonoxid	rot-orange	2000–3500		T Cam, U Cas
N	Kohlenstoff	rot	1900–3500		R Lep, Y CVn, U Hya

Um die Sterne genauer klassifizieren zu können, werden die Spektren weiterhin in den einzelnen Klassen von 0 bis 9 abgestuft. Es gibt heute mehrere Systeme der Spektralklassifikation, die sich dieser Schreibweise des Spektraltyps bedienen und ihre Klassen diesem System angleichen. Im ursprünglichen Harvard-System und dessen Erweiterung, dem MK-System, das zusätzlich die Leuchtkraftklassen definiert, wurden nicht alle diese Subtypen auch benutzt. Auf B3-Sterne folgten beispielsweise unmittelbar B5-Sterne, die Klasse B4 wurde übersprungen. Mit zunehmend besseren Instrumenten konnte im Laufe der Zeit feiner unterschieden werden, so dass Zwischenklassen definiert wurden, zum Beispiel gibt es zwischen B0 und B1 mittlerweile sogar drei zusätzliche Klassen, die B0.2, B0.5, und B0.7 genannt werden.

Die Spektralklassen mit ihren sieben Grundtypen (O, B, A, F, G, K, M) machen rund 99 % aller Sterne aus, weshalb die anderen Klassen oft vernachlässigt werden. Als Merksatz für diese Spektralklassen dienen die Sätze:

„Oh **Be** A Fine Girl Kiss **Me** (Right *Smack* Now)“: O B A F G K M (R S N)

„Oh **Be** A Fine Girl Kiss **My** Lips Tonight“: O B A F G K M L T

„Opa **B**astelt **A**m **F**reitag **G**erne **K**leine **M**ännchen“: O B A F G K M

„Offenbar **B**enutzen **A**stronomen **F**urchtbar **G**erne **K**omische **M**erksätze“: O B A F G K M

„Ohne **B**ier aus'm **F**ass gibt's **K**oa **M**ass“

Es gibt eine Vielzahl weiterer Varianten entsprechender Merksätze.

Klassen außerhalb der Standard-Sequenzen

Folgende Klassen lassen sich in die oben beschriebenen Sequenzen einordnen:

Q	Novae
Pv	Planetarische Nebel
W	Wolf-Rayet-Sterne
WN	Stickstofflinien
WC	Kohlenstofflinien

Prä- und Suffixe

Die Unterteilung der Spektralklassen kann durch Suffixe und Präfixe weiter unterteilt werden.

Suffixe

c	besonders scharfe Linien
comp	zusammengesetztes (engl. <i>composite</i>) Spektrum
d	Zwergstern (Hauptreihe; engl. <i>dwarf</i>)
e, em	Emissionslinien
g	normaler Riese (engl. <i>giant</i>)
k	interstellare Absorptionslinien
m	starke Metalllinien
n, nn	diffuse Linien
p, pec	Besonderheiten bei Linienintensität (engl. <i>peculiar</i> , „besonders“)
s	scharfe Linien
sd	Unterzwerg (engl. <i>sub dwarf</i>)
v, var	variables Spektrum
w	Weißer Zwerg

Teilweise werden diese Zusätze durch Angabe der Leuchtkraftklasse, die 1943 von William Wilson Morgan und Philip Keenan eingeführt wurden (daher auch: MK-System), überflüssig.

Präfixe

Präfix	Bedeutung	
	englisch (international)	deutsch
d	dwarf	Zwerg
sd	sub-dwarf	Unterzwerg
g	giant	Riese

Geschichte

Erste Versuche, Ordnung in die Helligkeit und Temperatur von Sternen zu bringen, hatten im Jahr 1865 der italienische Pater Angelo Secchi mit einer dreistufigen Skala unternommen und 1874 Hermann Carl Vogel mit einem System, in das auch die bis dahin bekannten Sternentwicklungstheorien eingeflossen waren, was zu ständigen Änderungen führte. Im Jahre 1868 entwickelte Angelo Secchi folgende vier Grundtypen:

- **Typ I** : weiße und blaue Sterne mit einer starken Wasserstofflinie (A-Klasse)
- **Typ II** : gelbe Sterne mit einer schwachen Wasserstofflinie, aber zahlreichen Metall-Linien (G und K-Klasse)
- **Typ III** : orange bis rote Sterne mit komplexen Banden (M-Klasse)
- **Typ IV** : rote Sterne mit signifikanten Kohlenstofflinien und Banden (Kohlenstoffsterne)

1878 fügte er eine weitere hinzu:

- **Typ V** : helle Spektrallinien (Be, Bf, etc.)

Aufbauend auf umfangreichen Spektren von Henry Draper wurde eine neue Klassifikation erarbeitet. Edward Charles Pickering begann im Jahre 1890, zusammen mit Williamina Fleming, Antonia Maury und Annie Jump Cannon entsprechende Arbeiten. Dabei ging Pickering alphabetisch vor und ordnete die Klassen mit Großbuchstaben von A bis Z nach der Balmer-Serie (Übergänge der Elektronenbahnen im Wasserstoffspektrum). Durch weitere Forschungen wurde dieses Schema durch die sogenannte Havard-Klassifikation ersetzt, die eine Unterteilung in die Typen A-Q vorsah.

Annie Jump Cannon stellte jedoch sehr bald fest, dass die Reihenfolge nicht sinnvoll war: nach der Abstufung kamen die blau-weiß leuchtenden, heißen O-Sterne nach den roten, relativ kühlen M- und N-Sternen. Ferner stellte sich heraus, dass einige der Klassen nur auf Belichtungsfehler beruhten oder keinen Sinn hatten und daher wegfallen konnten. Die Abstufung wurde nicht mehr vom Spektrum, sondern von der Temperatur der Sterne abhängig gemacht. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde die bisherige Unterteilung um 1912 umsortiert, und es folgte die heute verwendete Unterteilung in die sieben oben genannten Spektralklassen.

Siehe auch

- Klassifizierung der Sterne

Weblinks

- Sternspektren verschiedener Sterne ^[1]

Literatur

- Carlos Jaschek, M. Jaschek: *The classification of stars*, Cambridge: Cambridge University Press, 1987
- James B. Kaler: *Stars and Their Spectra. An Introduction to the Spectral Sequence*. Cambridge University Press 1997, ISBN 0521585708.
- James B. Kaler: *Sterne und ihre Spektren*. Spektrum Akademischer Verlag, 1994

- Theodor Schmidt-Kaler: *Physical Parameters of Stars* in: Landolt-Börnstein New Series, Vol. 2b, ed. K. Schaifers & H.H. Voigt (New York:Springer) 1982.
- R.F. Garrison: *The MK Process and Stellar Classification*. In: R.F. Garrison (Hrsg.): *The MK Process and Stellar Classification*. Proceedings of the Workshop in Honor of W.W. Morgan and P.C. Keenan, held at the University of Toronto, Canada, June 1983 (U. of Toronto, 1984).

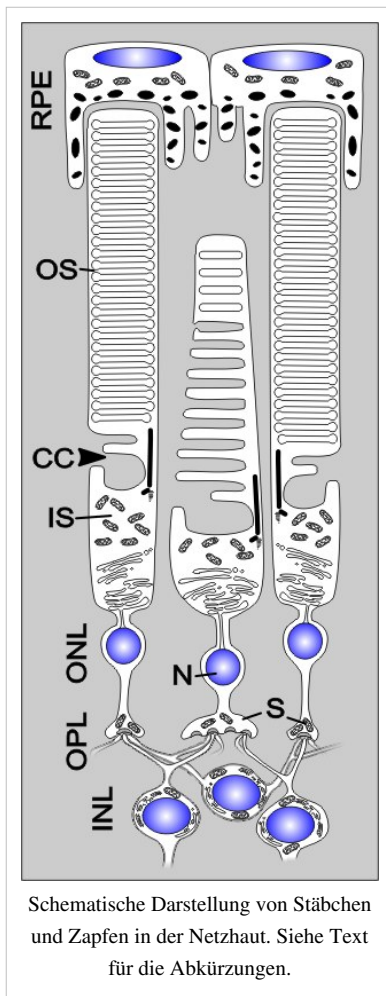
Referenzen

[1] <http://www.epsilon-lyrae.de/Spektroskopie/Sternspektren/SternspektrenGalerie.html>

Stäbchen (Auge)

Stäbchen (englisch *rod cells*, oder *rods*) sind die Fotorezeptoren in der Netzhaut des Auges, die dem Sehen bei geringer Helligkeit, dem *Skotopischen Sehen*, *Nachtsehen* oder *Dämmerungssehen*, dienen. Mit diesen spezialisierten, sehr empfindlichen Sinneszellen wird ein Lichtsignal aus der Außenwelt in ein für das Gehirn verwertbares Signal umgewandelt. Stäbchen erlauben *monochromatisches* Sehen, da die Rezeptorzellen nur auf das Licht eines bestimmten Wellenlängenbereichs reagieren (*Schwarz-Weiß-Sehen*). Viele Tiere besitzen zusätzlich die analog aufgebauten, weniger empfindlichen Zapfen, die für eine Farbwahrnehmung, das sogenannte *Photopische Sehen*, notwendig sind.

Aufbau und Funktion



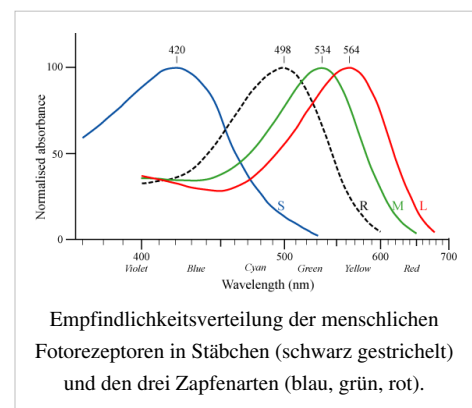
Im Aufbau sind Stäbchen und Zapfen ähnlich organisiert und bestehen aus einem Zellkörper, einer Synapse sowie einer Zellspezialisierung: dem Innen- und Außensegment. Im Außensegment („Outer segment“, **OS**) findet die visuelle Signaltransduktion durch die Sehfärbstoffmoleküle statt. Diese setzen sich aus einer chromophoren Gruppe (Retinal) und einem Glykoprotein (Opsin) zusammen. Diese Moleküle sind in vielen (>1000) membranösen Scheiben („Disks“) eingelagert. Die Außensegmente der Stäbchen sind lang, schmal und grenzen an das retinale Pigmentepithel (**RPE**), welches abgeschnürte, alte Membranstapel phagocytiert. Ein Außensegment ist über ein modifiziertes Cilium in dezentraler Lage, das Verbindungscilium („Connecting cilium“, **CC**), mit dem Innensegment verbunden. Neun Mikrotubuli-Dupletts in nonagonaler Anordnung bilden die innere Struktur dieses unbeweglichen Ciliums. An dieses schließt sich das stoffwechselaktive Innensegment („Inner segment“, **IS**) an, welches noch in das an Mitochondrien reiche Ellipsoid und in das Myoid mit dem endoplasmatischen Retikulum (**ER**) unterteilt ist. Hier erfolgt unter anderem die Proteinbiosynthese. Die folgende Schicht ist die äußere Körnerschicht („Outer nuclear layer“, **ONL**), welche den Zellkörper mit dem Zellkern (**N**) beinhalten. Von diesem geht ein Axon aus, welches mit einer Synapse (**S**) in der äußeren plexiformen Schicht („Outer plexiform layer“, **OPL**) endet. Die Synapsen der Photorezeptoren sind so genannte „Ribbon-Synapsen“, band- oder plattenartige Strukturen direkt an der aktiven Zone der Präsynapse. An die Ribbon-Struktur sind viele synaptische Vesikel gekoppelt und es können im Vergleich zu normalen Synapsen eine weit höhere Anzahl von Vesikel pro Zeiteinheit ausgeschüttet werden. Im Dunkeln erfolgt eine fortwährende Ausschüttung des Neurotransmitters Glutamat. Dieser wirkt in der Regel

exzitatorisch auf die Postsynapsen von Horizontal- und Bipolarzellen. Trifft Licht auf die Photorezeptorzelle, werden Ionenkanäle in der Zellmembran geschlossen, ausgelöst durch die Signaltransduktionskaskade. Die Photorezeptorzelle hyperpolarisiert und schüttet den Neurotransmitter nicht weiter aus. In der Folge werden die Ionenkanäle der nachgeschalteten Zellen geöffnet und so der Impuls an diese übertragen.

Lichtempfindlichkeit

Die Stäbchen des Menschen enthalten eine Form des Sehpigments Rhodopsin, die am empfindlichsten für Licht mit einer Wellenlänge von etwa 500 nm (blaugrün) ist. Diese Sinneszellen sind hauptsächlich für das Sehen in der Dämmerung und bei Nacht wichtig, da sie schon bei geringer Lichtintensität arbeiten. Durch die Stäbchen können keine Farben unterschieden werden, weil im Gegensatz zu den Zapfen alle Stäbchen dasselbe Empfindlichkeitsspektrum aufweisen. Im Außenbereich der Netzhautmitte (5–6 mm) überwiegt die Zahl der Stäbchen, wodurch der Mensch bei Dämmerung in der Peripherie besser sieht als im Zentrum. Insgesamt befinden sich im menschlichen Auge etwa 120 Millionen Stäbchen.

Die größere Lichtempfindlichkeit der Stäbchen gegenüber den Zapfen hat im wesentlichen zwei Ursachen:



- Zum einen sind die lichtempfindlichen Pigmentscheiben im oberen Teil der Stäbchen lichtempfindlicher. Bereits ein einzelnes absorbiertes Photon führt nach einer Reihe von intrazellulären Prozessen zu einer Membranspannungsänderung von etwa 1 mV. Zapfen benötigen hingegen eine wesentlich größere Photonenanzahl (mindestens etwa 200) um ein verlässliches Lichtsignal an die nachgeschalteten Zellen weiterzuleiten.
- Der zweite Grund liegt in der neuronalen Verschaltung der Rezeptoren mit nachgeschalteten Zellen. Grob gesagt leiten viele Stäbchen ihr Signal an eine einzige Ganglionzelle (über Bipolarzellen etc.) weiter, während *ein* Zapfen in vielen Fällen auch nur auf jeweils *eine* Ganglionzelle ableitet. D. h. die Information der Stäbchen konvergiert ungleich stärker als jene der Zapfen. Darin liegt auch der Grund für die schlechte räumliche Auflösung des Stäbchensehens (z. B. in der Nacht). Erhält eine Ganglienzelle (über welche die Information letztendlich weiter Richtung Gehirn geleitet wird) ein Stäbchensignal, so kann dieses von vielen verschiedenen Stäbchen, die mit ihr Synapsen bilden, stammen und der Punkt auf der Netzhaut, wo das Bild abgebildet wird, ist somit relativ vage. Erhält eine Ganglienzelle hingegen Zapfeninformation, so kann der Lichtpunkt sehr gut auf der Retina lokalisiert werden, da nur sehr wenige Zapfen mit ihr verbunden sind.

Erregungsweiterleitung bei Stäbchen und Zapfen

Die übergroße Mehrheit der Nervenzellen (Neurone) leitet ihre Information über sogenannte Aktionspotentiale an andere Neurone weiter. Vereinfacht gesprochen wird durch die Reizung eines Neurons in ihm eine Spannungsänderung bewirkt (die eigentlich negativ geladene Zelle wird für kurze Zeit positiv geladen), was dazu führt dass das Neuron über eine synaptische Verbindung Botenstoffe (Neurotransmitter) ausschüttet. Diese Neurotransmitter binden sich an Rezeptoren des nachgeschalteten Neurons und führen auch dort zu Spannungsänderung usw. Bei dieser gewöhnlichen Art der Erregungsweiterleitung wird die Information nicht durch die Stärke des Aktionspotentials (der bewirkten Spannungsänderung) kodiert, sondern einzig durch die Frequenz der Aktionspotentiale. Das nachgeschaltete Neuron interessiert sich also nicht dafür, wie stark das Aktionspotential des anderen Neurons ist bzw. wie viele Botenstoffe ausgeschüttet werden, sondern einzig dafür, wie oft in einer bestimmten Zeitspanne ein Aktionspotential auftritt. Dem entspricht die Frequenz der Aktionspotentiale, es ist also frequenzmoduliert. Die vom vorhergehenden Neuron ausgeschütteten Botenstoffkonzentration kann als annähernd proportional zu den folgenden Potentialen an den Folgezeptoren gesehen werden. Diese finden ihre Codierung in der Aktionspotentialfrequenz am Folgeuron wieder, sofern die Rezeptorpotentiale einen gewissen Schwellenwert übersteigen. Aufgrund der Proportionalität von Botenstoffen und Rezeptorpotential gleicht diese Frequenz der des vorherigen Neurons.

Die Erregungsweiterleitung in Stäbchen und Zapfen funktioniert jedoch auf andere Weise: Sie kodieren die Lichtinformation nicht über die Frequenz von Aktionspotentialen, sondern über die Stärke ihrer intrazellulären Spannungsänderung. Die meisten anderen Neurone sind in ihrer Ruhelage (wenn kein Reiz eintrifft) mit etwa -65 mV negativ geladen. Wirkt auf sie ein Reiz ein, schnellte die Ladung für kurze Zeit auf etwa $+10$ bis $+30$ mV nach oben und ein Aktionspotential wird durch diese Depolarisation ausgelöst. Stäbchen und Zapfen sind in ihrer Ruhelage (wenn kein Licht eintrifft) jedoch mit etwa -40 mV weniger stark negativ geladen - also leicht depolarisiert. Sobald Licht auf sie einwirkt, werden sie noch negativer geladen (bis max. etwa -65 mV) - also hyperpolarisiert - anstatt wie die anderen Neurone positiver zu werden. Grob gesagt schüttet jedes Neuron umso mehr Botenstoffe aus, je positiver geladen es ist. Während normale Neurone also bei einem Reiz (der Depolarisation bewirkt) auf einmal sehr viel mehr Botenstoffe ausschütten, läuft diese Reaktion bei Fotorezeptoren genau umgekehrt ab: Trifft ein Lichtreiz ein werden sie noch negativer (hyperpolarisiert) und schütten *weniger Botenstoffe* als in Ruhelage aus. Nachgeschalteten Zellen wird der Lichtreiz also nicht durch mehr, sondern *durch weniger* ausgeschüttete Botenstoffe signalisiert. Im Gegensatz zu den anderen Neuronen spielt bei den Fotorezeptoren nicht die Frequenz, sondern die Stärke der Spannungsänderung die wichtigste Rolle bei der Reizintensitätskodierung. Die Intensität des Lichtreizes wird den nachgeschalteten Zellen durch das Ausmaß der Botenstoffreduzierung mitgeteilt - je weniger Botenstoffe, desto stärker war der Lichtreiz.

Subtraktive Farbmischung

Als **Subtraktive Farbmischung**, **Subtraktive Farbsynthese** oder **Physikalische Farbmischung** wird die Änderung eines Farbreizes bei Reflexion von der Oberfläche eines Körpers^[1] durch Remission oder beim Durchgang durch ein Medium (Farbfilter)^[2] durch Transmission bezeichnet. Wird hingegen etwas zugefügt, Farbreiz zu Farbreiz,^[3] spricht man von Additiver Farbmischung.

Im engeren Sinne versteht man unter Subtraktiver Farbmischung jenes extreme Prinzip, bei dem durch Hintereinanderschalten von drei Farbfiltern die Vielfalt des Farbenraums reproduziert wird.^[4]

Physikalischer Vorgang und Begriff

Die subtraktive Farbmischung kann nicht durch einfache Umkehr der Additiven Farbmischung erklärt werden. Im Gegensatz zur additiven Farbmischung, eine physiologische Farbmischung, handelt es sich um einen reinen physikalischen Vorgang, auch physikalische Farbmischung genannt, der von der Farbwahrnehmung unabhängig ist.^[5] Mit Hilfe von Farbfiltern werden nicht Farben gemischt, sondern es findet eine Änderung des Lichtspektrums statt, in deren Folge erst veränderte Farben gesehen werden.

Der physikalische Vorgang ist auch nicht subtraktiv sondern multiplikativ. Das veränderte Lichtspektrum ist das Ergebnis der spektralen Remissionsgrade (Maß für reflektiertes Licht) und Transmissionsgrade (Maß für durchgelassenes Licht). Das Produkt dieser Reflexionen oder Durchlässigkeiten mit der ursprünglichen spektralen Verteilung (Strahlung) wird geänderte Strahlungsverteilung (Farbreizfunktion $\varphi(\lambda)$) genannt.^[6] Die geänderte Farbreizfunktion ist auf weniger Anteile des Lichtspektrums reduziert (subtraktiv = reduzierend) als die primäre. Von der Strahlungsenergie wird etwas weggenommen.^[4]

Bedingt gleiche Farbfilter ergeben je beim Hintereinanderschalten mit einem weiteren Filter unterschiedliche Farbreize, während sich bedingt gleiche Farben (Strahlungen) bei additiver Farbmischung völlig gleich verhalten.^[5]

Die Erklärung beruht auf der Dreifarbentheorie und der Tatsache, dass die Zapfen auf der Netzhaut des Auges ihre maximale Empfindlichkeit für diejenigen Wellenlängen-Bereiche des Lichts haben, denen wir die Farbempfindungen Blau, Grün und Rot zuordnen: Werden in der Anordnung oben die Farbfilter Gelb, Magenta und Cyan mit neutralweißen Licht durchleuchtet, werden durch Absorption komplementärfarbige Spektralbereiche herausgefiltert. Beim gelben Filter wird zum Beispiel der blaue Bereich absorbiert. Das passierte Spektrum kann die blauempfindlichen Zapfen wenig oder kaum anregen und wird deshalb vom Auge als Gelb registriert. Das gelbe und das cyanfarbige Filter absorbieren zusammen den blauen und den roten Bereich. Der grüne Bereich, für den das Auge einen eigenen Zapfentyp besitzt, kann passieren. Wo das magentafarbige Filter dazukommt, wird die unbunte Farbe Schwarz wahrgenommen, denn dieses absorbiert den bisher noch durchgelassen grünen Bereich. Außerhalb der Filter passiert das unbeeinflusste ursprüngliche Licht und verursacht im Auge die Wahrnehmung höchster Helligkeit beziehungsweise den Farbeindruck Weiß.

Die Farben der Filter, im Bild oben Gelb, Magenta und Cyan, werden als Primärfarben der subtraktiven Farbmischung, die erzeugten Farben als Sekundärfarben, hier Blau, Grün und Rot, bezeichnet.



Anwendungen

Körperfarben

Die Färbungen absorbieren (verschlucken) bestimmte Lichtwellen und reflektieren die übrigen. Da die Körperoberflächen in der Regel nicht gleich glatt beziehungsweise nicht gleich rau sind, ändert sich der Farbreiz zusätzlich, weil die Lichtstreuung verschieden ist.

Filterfarben

Farbdruck und Fotos auf Papier

Beim Drucken werden die durchsichtigen Farbschichten Cyan, Magenta und Gelb (Yellow) (CMYK-Verfahren, zum Beispiel beim Tintenstrahldrucker) auf eine weiße Unterlage übereinander gelegt. Der das Lichtspektrum verändernde Vorgang findet dabei sowohl vor als auch nach der Reflexion an der Unterlage statt.

Auch beim farbigen Papierfoto liegen durchsichtige Farbschichten, die den Konturen des Bildinhaltes folgen, auf weißer Unterlage übereinander.

Farbfilm

Bei den Farbfilmen liegen auf einem glasklaren Trägerfilm durchsichtige Farbschichten übereinander. Sie verändern das Farbspektrum des durchscheinenden Lichtes. Das Prinzip ist sowohl beim Negativfilm als auch beim Diafilm die subtraktive Farbmischung. Auf dem Negativfilm befinden sich die "negativen" Farben, das sind die Komplementärfarben der im Folgeprozess auf dem Papierbild erzeugten "richtigen" Bildfarben. Auf dem Diafilm werden bereits die "richtigen" Bildfarben "gemischt".

Siehe auch

- Lambert-Beersches Gesetz
- Farbfotografie
- Farblehre
- Farbkreis

Literatur

- Martin Richter: *Einführung in die Farbmimetik*. de Gruyter, 1981, ISBN 3-11-008209-8, Kapitel 11: *Sogenannte subtraktive Farbmischung*
 - Harald Küppers: *Das Grundgesetz der Farbenlehre*. DuMont Literatur und Kunst Verlag, Köln 1978. 10. Auflage 2002.
-

Einzelnachweise

- [1] Martin Richter: *Einführung in die Farbmimetrik*. de Gruyter, 1981, ISBN 3-11-008209-8, S. 51 und 81
- [2] Martin Richter: *Einführung in die Farbmimetrik*. de Gruyter, 1981, ISBN 3-11-008209-8, S. 87
- [3] Harald Küppers: *Das Grundgesetz der Farbenlehre*. DuMont, 2004, ISBN 3-83-2-11057-7, S. 175
- [4] Harald Küppers: *Das Grundgesetz der Farbenlehre*. DuMont, 2004, ISBN 3-83-2-11057-7, S. 178
- [5] Martin Richter: *Einführung in die Farbmimetrik*. de Gruyter, 1981, ISBN 3-11-008209-8, S. 89
- [6] Martin Richter: *Einführung in die Farbmimetrik*. de Gruyter, 1981, ISBN 3-11-008209-8, S. 88



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

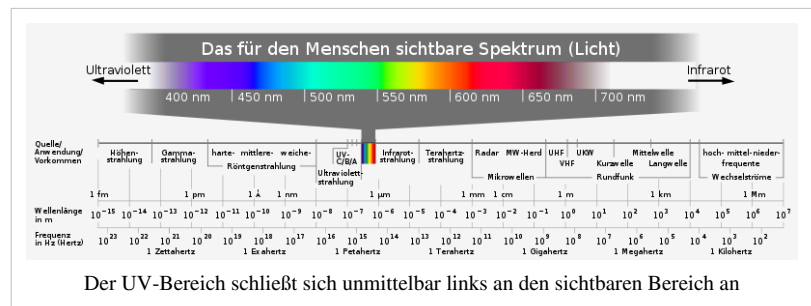
Ultraviolettstrahlung

Ultraviolettstrahlung, kurz **Ultraviolett** oder **UV-Strahlung**, auch **ultraviolettes Licht** oder **UV-Licht**, umgangssprachlich **Schwarzlicht**, selten auch **Infraviolett-Strahlung** (Abk. *IV-Strahlung*) ist für den Menschen unsichtbare elektromagnetische Strahlung mit einer Wellenlänge, die kürzer als die des für den Menschen sichtbaren Lichtes, aber langwelliger als die Röntgenstrahlung ist.

Die Bezeichnung *ultraviolett* (etwa „jenseits von Violett“) rührt dabei daher, dass das UV-Spektrum mit etwas kürzeren Wellenlängen als jenen beginnt, die der Mensch gerade noch als Farbe Blauviolett wahrzunehmen vermag.

Entdeckung

Die Entdeckung der UV-Strahlung folgte schnell aus den ersten Experimenten mit der Schwärzung von Silbersalzen im Sonnenlicht. Im Jahr 1801 machte der deutsche Physiker Johann Wilhelm Ritter die Beobachtung, dass Strahlen gerade jenseits des violetten Endes im sichtbaren Spektrum unglaublich effektiv waren im Schwärzen von Silberchloridpapier. Er nannte die Strahlen zunächst „de-oxidierende Strahlen“, um ihre chemische Wirkungskraft zu betonen und sie von den infraroten „Wärmestrahlen“ am anderen Ende des Spektrums zu unterscheiden. Bis ins 19. Jahrhundert wurde UV als „chemische Strahlung“ bezeichnet. Heutzutage werden aber nur noch die Namen „Infrarotstrahlung“ und „Ultraviolettstrahlung“ verwendet, um die beiden unterschiedlichen Strahlungsarten zu charakterisieren.^[1]



Anfang des 20. Jahrhunderts entdeckte man die heilende Wirkung des künstlichen UV-Lichtes. So berichtete der österreichische Arzt Gustav Kaiser (1871 – 1954), der sich in Würzburg mit elektrotherapeutischen Studien beschäftigt hatte, in der Vollversammlung der Gesellschaft der Ärzte Wiens im Februar 1902 über den Selbstversuch mit einer UV-Glühlampe, mit deren Hilfe er die Gesundheit einer nicht heilen wollenden Wunde erreichte. Eine schwer erkrankte tuberkulöse Patientin soll nach dem vorliegenden Bericht mittels des „blauen Lichtes“ in 4 Wochen

geheilt worden sein. Ermutigt durch diese Erfolge dehnte Kaiser seine Versuche mit einer Hohllinse auf Hautkrankheiten aus, wobei er ebenfalls sehr günstige Ergebnisse erzielte. Er zog daraus den Schluss, dass die UV-Strahlung keimtötend wirkt. ^[2]

Spektrum

Das ultraviolette Spektrum umfasst Wellenlängen von 1 nm bis 380 nm, die Frequenz der Strahlung reicht also von 789 THz (380 nm) bis 300 PHz (1 nm).

Einteilung nach Wellenlänge

Name	Abkürzung	Wellenlängenbereich in nm	Photonenenergie
<i>Nahes UV</i> („Schwarzlicht“)	UV-A	380–315 nm	3,26–3,94 eV
<i>Mittleres UV</i> (Dornstrahlung)	UV-B	315–280 nm	3,94–4,43 eV
<i>Fernes UV</i>	UV-C-FUV	280–200 nm	4,43–6,2 eV
<i>Vakuum-UV</i>	UV-C-VUV	200–100 nm	6,20–12,4 eV
<i>Extremes UV</i> (keine DIN 5031)	EUV, XUV	100 –1 nm	12,4–1240 eV

Nach DIN 5031, Teil 7 wird Strahlung im ultravioletten Bereich unterteilt in UV-A, UV-B und UV-C. Außerhalb der DIN existieren mehrere, sich überlappende und nicht genau definierte Unterteilungsmuster. Dies gilt insbesondere für den biologischen und dermatologischen Bereich. Die nachfolgende Tabelle orientiert sich hinsichtlich der Begriffsverwendung und der energetischen Zuordnung direkt an der DIN 5031.

Für UV-Strahlung mit Wellenlängen unter 300 nm ist in der Fotolithographie und der Lasertechnik der Begriff "tiefes Ultraviolett" (engl.: deep ultraviolet = DUV) gebräuchlich. Unterhalb 200 nm ist Ultraviolettstrahlung so kurzwellig bzw. energiereich, dass sie durch molekularen Sauerstoff (O_2) absorbiert wird; dabei wird der molekulare Sauerstoff (O_2) in zwei freie Sauerstoffradikale ($2 O$) gespalten, die jeweils mit einem weiteren Molekül Sauerstoff (O_2) zu Ozon (O_3) weiterreagieren. UV-Strahlung mit Wellenlängen kleiner 200 nm kann sich folglich nur unter Schutzgas und die kurzwelligen Anteile unter 100 nm nur noch im Vakuum ausbreiten, daher stammt auch der Ausdruck "Vakuum-Ultraviolett".

Eine vollständige Übersicht über die elektromagnetischen Wellenbereiche findet sich im Artikel Elektromagnetisches Spektrum.

Ultraviolettstrahlungsquellen

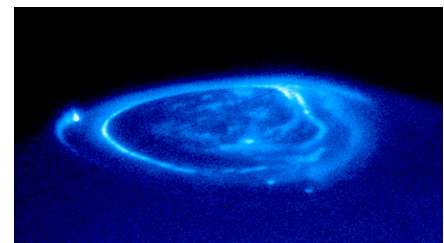
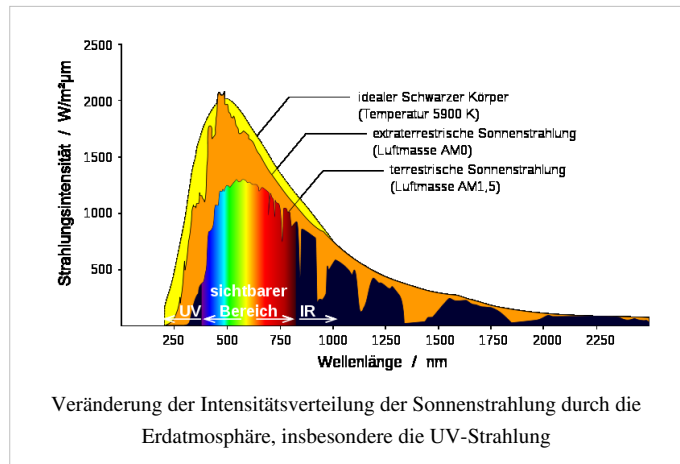
Bei Thermischer Strahlung wird der Anteil der UV-Strahlung durch das Plancksche Strahlungsgesetz und das Wiensche Verschiebungsgesetz bestimmt. Durch angeregte Elektronen kann dann UV-Strahlung generiert werden, wenn deren Energie oberhalb 3,3 eV liegt. Das ist auch bei der Temperatur der Glühlampen von Glühlampen bereits in geringem Maße gegeben, weshalb insbesondere Halogen-Glühlampen auch etwas Ultraviolett aussenden.

Natürliche Quellen

Ultraviolettstrahlung kommt in der Sonnenstrahlung vor. Wegen der Absorption in der Erdatmosphäre (besonders in der Ozonschicht) dringt jedoch vor allen Dingen UV-A- und wenig UV-B-Strahlung mit einer Wellenlänge oberhalb 300 nm bis zur Erdoberfläche vor. Bestimmte Gase, insbesondere FCKW, verschieben das Gleichgewicht in der Ozonschicht und führen zum Ozonloch – die UV-B-Exposition der Erdoberfläche nimmt dadurch zu.

Auch andere kosmische Objekte wie Pulsare, hochangeregte Gasmassen sowie die meisten Fixsterne senden UV-Strahlung aus.

Weiterhin enthält auch das Polarlicht Ultraviolettstrahlung. Weitere natürliche irdische Ultraviolettquellen sind Gewitterblitze und St.-Elms-Feuer.



Polarlicht über Jupiters Nordpol, vom Hubble Space Telescope im UV-Spektrum fotografiert

Künstliche Quellen

Ultraviolettstrahlung kann künstlich hergestellt werden, häufig z. B. mit Quecksilberdampflampen:

- in industriellen UV-Strahlersystemen; Quecksilberdampf-Mitteldruck-, -Hochdruck- und -Höchstdrucklampen (Fotolithografie, Aushärten von Harzen und Lacken, Wasser-Desinfektion)
- in der sogenannten Höhensonne, einer Quecksilberdampf-Hochdrucklampe (früher zur Therapie u. a. von Akne und Rachitis verwendet)
- in Solarien, ausgestattet mit Quecksilberdampf-Niederdruck-Röhren (UV-A, Bräunung, jedoch umstritten aufgrund möglicher Hautschädigung)
- in den sogenannten Schwarzlichtlampen: Glühlampen mit Filter oder Quecksilberdampf-Niederdrucklampen mit Filter und Leuchtstoff für UV-A (Deko-Zwecke, Disco, mineralogische Untersuchungen)
- Ultraviolett-Laser (Excimerlaser, neuerdings auch Diodenlaser)
- UV-Leuchtdioden

Weitere Quellen, deren Ultraviolett-Emission jedoch zweitrangig ist, sind Gasentladungslampen (auch sog. Tageslichtlampen und Vollspektrumröhren u. ä.; hierbei ist die UV-Emission jedoch gesundheitlich unbedenklich, im Gegenteil sogar gewünscht), das Lichtbogenschweißen (sämtliche elektrischen Schweißarten (MAG, MIG, WIG), die Koronabehandlung (siehe auch Ionisator) sowie alle Prozesse, bei denen ionisierte Gase oder sehr hohe Temperaturen auftreten (z. B. Laser-Materialbearbeitung, Ionenquellen, Funkenstrecken usw.).

Wechselwirkung

Ultraviolettstrahlung wird vom menschlichen Auge nicht mehr wahrgenommen, manche Tiere (Insekten, Vögel, Fische, Reptilien) können sie jedoch teilweise sehen. Sie zählt neben dem sichtbaren Licht und der Infrarotstrahlung zur Gruppe der *optischen Strahlung*, da sie gebrochen, reflektiert, transmittiert, absorbiert und/oder gebeugt werden kann.

Unterhalb einer Wellenlänge von ca. 200 nm ist die Energie eines einzelnen ultravioletten Lichtquants ausreichend, um Elektronen aus Atomen oder Molekülen zu lösen, d. h. diese zu ionisieren. Wie auch bei Gamma- und Röntgenstrahlung bezeichnet man daher kurzwellige Ultraviolettstrahlung unterhalb ca. 200 nm als ionisierende Strahlung.

Physik

Gewöhnliches Fensterglas ist für einen großen Teil der ultravioletten Strahlen undurchlässig. Das gilt besonders für UV-Strahlen mit kurzen Wellenlängen (UV-B und UV-C), für UV-A ist Fensterglas jedoch durchlässig. Quarz ist für den gesamten natürlich vorkommenden UV-Bereich transparent. Normales Glas (Natron-Kalk-Glas) ist für Ultraviolettstrahlung unterhalb von 320 nm nicht durchlässig, Borosilikatglas (Jenaer Glas) lässt dagegen UV-Strahlung bis etwa 290 nm passieren. Strahlung unterhalb von 290 nm transmittiert z. B. durch natürliche oder synthetische Quarzkristalle und auch Quarzglas (Kieselglas). Weil natürlicher Quarz und auch gewöhnliches Kieselglas durch seinen Titangehalt keine UV-Strahlung unterhalb 200 nm transmittieren lässt, wird z. B. für ozongenerierende UV-Lampen synthetisches hochreines Quarzglas verwendet (z. B. in der Aufbereitung hochreinen Wassers zur Oxidation der gelösten organischen Kohlenstoffverbindungen oder für die ArF-Excimer-Laser-Wellenlänge 193 nm).

Für noch kürzere Wellenlängen (bis herab zu 45 nm) wird einkristallines Kalziumfluorid verwendet.

Kurzwelliges Ultraviolett hoher Intensität trübt Gläser und optische Komponenten; an Optiken (z. B. für Excimerlaser) werden daher hohe Reinheitsanforderungen gestellt.

Ultraviolett regt viele Stoffe zur Fluoreszenz an.

Der Äußere Photoeffekt tritt bei Ultraviolett an allen Metalloberflächen auf; er wird in Photomultipliern u. a. an Szintillationsdetektoren zur Registrierung ultravioletter Strahlungsimpulse genutzt (Neutrinodetektor, Nachweis und Klassifizierung ionisierender Strahlung).

Chemie

UV-Strahlung vermag organische Bindungen zu spalten, aber auch zu schaffen. Es kann die Vernetzung von Monomeren initiieren oder organische Bindungen zerstören. Viele Kunststoffe werden durch Ultraviolettstrahlung geschädigt (Trübung, Versprödung, Zerfall).

Sauerstoff wird durch kurzwellige UV-Strahlung unterhalb 200 nm in atomaren Sauerstoff gespalten, es kommt zur Bildung von Ozon und einer Vielzahl anderer Folgereaktionen (siehe Ozonschicht).

Biologie

Obwohl die Ultraviolettstrahlung die niederenergetischste der ionisierenden Strahlungen ist, kann sie für den Menschen und andere Organismen gefährlich werden. Auch UV-Strahlung mit größerer Wellenlänge vermag bereits chemische Bindungen organischer Moleküle zu zerstören. Daher ist ein verantwortungsvoller Umgang mit Sonnenlicht (Sonnenschutz) oder mit technischen UV-Quellen angebracht. Auch der übermäßige Besuch von Solarien ist aus diesem Grund umstritten.

Die Wirkung der UV-Strahlung teilt sich wie folgt auf:

Bereich	Wellenlänge	Biologische Wirkung
UV-A	320–400 nm	<p>Lange Wellen gelangen bis zur Lederhaut und bewirken</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>direkte Pigmentierung</i> (Konformationsänderung des Melanins) – nur Stunden anhaltende, <i>kurzfristige</i> Bräune, <i>kaum</i> Lichtschutz; • Schädigung der Kollagene – die Haut verliert Spannkraft und altert frühzeitig; • hohes Melanomrisiko durch Bildung freier Radikale; • sind jedoch <i>gering</i> erythem (Sonnenbrand erzeugend).
UV-B	280–320 nm	<p>Kurze Wellen</p> <ul style="list-style-type: none"> • bewirken in der Oberhaut ca. 72 Stunden verzögert Bildung von Melanin – „<i>indirekte Pigmentierung</i>“, „<i>verzögerte</i>“, <i>langfristige</i> Bräunung (vgl. Hautfarbe) mit echtem <i>Lichtschutz</i>; • dringen jedoch auch tiefer, mit <i>stark erythemem</i> Effekt (Sonnenbrand); • führen zur Bildung des anti-rachitischen Cholecalciferol (Vitamin D₃) in der Haut; da Vitamin D₃ im eigentlichen Sinne aber ein Hormon ist, welches durch UV-B produziert wird, kommt der UV-B-Strahlung selbst Vitamincharakter zu. In dieser Rolle ist UV-B nicht nur lebensnotwendig, es wirkt auch vorbeugend gegen Krebs, auch gegen <i>Hautkrebs</i>.^[3] Es gibt Forscher, die behaupten, dass auf jeden, der an sonnenbedingtem Hautkrebs gestorben ist, 30 Menschen kommen, die durch Vitamin D vor dem Krebstod bewahrt werden.^[4]
UV-C	100–280 nm	<p>Sehr kurzwellig, gelangt nicht bis zur Erdoberfläche, Absorption durch die obersten Luftschichten der Erdatmosphäre, unterhalb etwa 200 nm durch Photolyse des Luftsauerstoffs ozongenerierend.</p> <p>UV-C-Strahlung (vor allem die bei niedrigem Dampfdruck, mit hoher Ausbeute (30–40 %) der angelegten elektrischen Leistung anregbare Emissionslinie des Quecksilberdampfs bei 253,652 nm) findet in der physikalischen Entkeimungstechnik eine technische Anwendung (siehe auch Quecksilberdampflampen). Während bei 280 nm (Absorptionsmaximum der meisten Proteine) die darin eingebaute Aminosäure Tryptophan die ultraviolette Strahlung absorbiert, werden bei 265 nm Nukleinsäuren am stärksten geschädigt. Bei etwa 245 nm absorbieren vor allem die Nukleinsäuren, während Proteine hier ein relatives Absorptionsminimum zwischen dem Absorptionsmaximum um 280 nm durch aromatische Aminosäuren (Tryptophan, Tyrosin und Phenylalanin) und der Absorption durch die Peptidbindung zwischen den einzelnen Aminosäuren (Maximum bei etwa 220 nm) zeigen. Daher ist bei 253,7 nm (Primärstrahlung der Niederdruck-Quecksilberdampfentladung) auch die Bestrahlung von Proteinlösungen (z. B. Tierseren für die Zellkultur) zur Inaktivierung darin enthaltener Viren und Bakterien möglich.</p>

UV-Strahlung mit Wellenlängen unter 100 nm kommt im Sonnenlicht nur mit sehr geringer Intensität vor.

Die Schädigung hängt nicht nur von der Energie der UV-Strahlung ab, sondern auch von der Eindringtiefe und der Zeit der Bestrahlung des Gewebes. Beispielsweise wird UV-C-Strahlung bei 253,7 nm durch verhornte Haut praktisch schon an der Oberfläche vollständig absorbiert und ist daher weniger effektiv bei der Schädigung tieferliegender Zellschichten als UV-B-Licht, das schwächer absorbiert wird und bis in diese eindringt. Ein durch eine UV-C-Lampe versehentlich hervorgerufener Sonnenbrand klingt daher schon innerhalb eines Folgetages vollständig ab.

Allerhöchste Vorsicht ist jedoch bei Exposition der Augen geboten. Ultraviolett führt zu Bindehautentzündung und Trübung der Hornhaut. Daher muss zum Beispiel beim Lichtbogenhandschweißen eine Schweißblende benutzt werden – kurzwellige UV-Strahlung kann sehr schnell zur Augenschädigung bis zur Erblindung führen. Durch Lichtbögen und auch Funkenstrecken entsteht ein breites Spektrum intensiver UV-Strahlung, das bei ungeschützter Anwendung (offen liegende Körperteile) bereits nach wenigen Minuten eine Verbrennung der Haut ähnlich einem Sonnenbrand verursacht. Die Haut fühlt sich dabei „trocken“ an und fängt an zu „spannen“. Es treten Verbrennungen 1. Grades (Rötung) bis 2. Grades (Blasenbildung) auf.

Langzeitschäden wie Hautalterung, Hautkrebs oder Katarakt können auch auftreten, wenn die Erythemschwelle zwar nicht überschritten wird, die Bestrahlung aber häufig erfolgt. Haut und Augen registrieren **jede** UV-Strahlung und nicht nur diejenige, die über der Erythemschwelle liegt.

DNA-Schäden entstehen durch UV-Strahlung, wenn sich zwei benachbarte Thyminbasen kovalent miteinander verbinden, sodass sie ein Thymindimer bilden. Diese behindern die Replikation oder führen zu Mutationen. Mittels

des Enzyms Photolyase und Licht können diese Dimere wieder gespalten und so die DNA repariert werden. Bei allen Plazentatieren, so auch dem Menschen, wurde die Funktion der Photolyase im Laufe der Evolution durch das Nukleotid-Exzisions-Reparatursystem (NER) übernommen.^[5] Bei Kindern, die an der Krankheit Xeroderma pigmentosum leiden, liegt ein Defekt der Reparaturenzyme des NER vor. Das hat eine absolute Unverträglichkeit natürlicher Sonnenstrahlung zur Folge („Mondscheinkinder“). Die Patienten entwickeln unter Exposition von natürlicher UV-Strahlung deutlich schneller maligne Hauttumoren als Menschen ohne vergleichbare Enzymdefekte.

UV-B-Strahlung wurde früher auch *Dorno-Strahlung* genannt, nach Carl Dorno, der diese intensiv untersuchte. Sie bewirkt die photochemische Bildung des anti-rachitischen Calciferol (Vitamin D) in der Haut.

Der UV-Index ist eine international festgelegte Messgröße. Er beschreibt die sonnenbrandwirksame solare Bestrahlungsstärke. In der Vorhersage und Warnung wird der UV-Index als maximal zu erwartender UV-Index (max. UVI) angegeben. Er variiert abhängig von der geographischen Lage, der Höhe, sowie von Jahreszeit und Wetterlage.

Anwendungen

Übersicht elektromagnetisches Spektrum im Bereich der UV-Strahlung mit Anwendungsbereichen

Bezeichnung	Wellenlänge	Frequenz	Photonen-Energie	Erzeugung / Anregung	Technischer Einsatz
UV-Strahlen	1–380 nm	> 789 THz	$> 5,2 \times 10^{-19} \text{ J}$ > 3,3 eV		Desinfektion, UV-Licht, Spektroskopie
<i>schwache UV-Strahlen</i>	200–380 nm	> 789 THz	$> 5,2 \times 10^{-19} \text{ J}$ > 3,3 eV	Gasentladung, Synchrotron, Excimerlaser	Schwarzlicht Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Banknotenprüfung, Fotolithografie
<i>Starke UV-Strahlen</i>	50–200 nm	> 1,5 PHz	$> 9,9 \times 10^{-19} \text{ J}$ > 6,2 eV	Gasentladung, Synchrotron, Excimerlaser	
XUV	1–50 nm	6 PHz – 300 PHz	$2,0 \times 10^{-16} - 5,0 \times 10^{-18} \text{ J}$ 20 – 1000 eV	XUV-Röhre, Synchrotron	EUV-Lithografie, Röntgenmikroskopie, Nanoskopie

Fluoreszenzanregung

Lichtquellen

Ultraviolett ist die primäre Emission in Leuchtstofflampen, effizienten weißen Lichtquellen, in denen die Ultraviolett-Emission einer Gasentladung von Quecksilberdampf zur Anregung von im sichtbaren Spektralbereich fluoreszierenden Leuchtstoffen genutzt wird.

Auch andere Gasentladungslampen enthalten manchmal Leuchtstoffe, um die Farbwiedergabe zu verbessern, indem diese mit dem Ultraviolett-Strahlungsanteil der Entladung angeregt werden. Weiße Leuchtdioden benutzen dafür jedoch einen blau strahlenden Chip und durch Blau anregbare Leuchtstoffe.

Von sog. *Tageslichtlampen* und *Vollspektrumröhren* (u. ä. Bezeichnungen, herstellerabhängig) wird ein dem Sonnenlicht möglichst ähnliches Lichtspektrum inkl. UV und Infrarot abgegeben, um eine natürliche Beleuchtung (insb. in Innenräumen, siehe auch Ergonomie) zu ermöglichen; hierbei ist die Menge der UV-Emission gesundheitlich unbedenklich.

Biologische Analysen

Einige Farbstoffe, wie z. B. das in den Biowissenschaften verwendete DAPI, werden von UV-Strahlung angeregt und emittieren dann ein längerwelliges, also meist sichtbares Licht. Fluoreszierende Stoffe werden als Marker eingesetzt, um biologische Stoffwechselvorgänge oder Genvariationen zu beobachten.

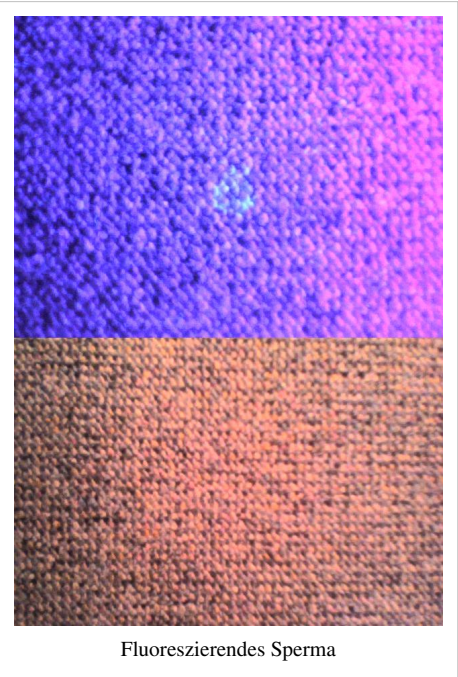
Forensik: Sichtbarmachen von Blut und Sperma^[6]. Das wird z. B. bei der Aufklärung von Kriminalfällen eingesetzt, wenn biologische Spuren (Blut, Sperma, Speichel) an Wänden, in Textilien usw. nachgewiesen werden sollen.

Schwarzlicht

„Schwarzlicht“, auch unter der englischen Bezeichnung „Blacklight“ ist eine umgangssprachliche Bezeichnung für UV-A-Strahlung, erzeugt durch:

- Niederdruck-Gasentladungslampen ähnlich Leuchtstofflampen, jedoch mit Leuchtstoffen, die Ultraviolett bei 350 nm oder 370 nm abgeben.
- Glühlampen mit einem das sichtbare Licht absorbierenden Glaskolben (Nickeloxid-dotiert).
- Ultraviolett-Leuchtdioden

„Schwarzlicht“ ist vor allem in Diskotheken und für Showeffekte üblich und entfaltet seine Wirkung nur in abgedunkelten Räumen: Die Strahlung regt fluoreszierende Stoffe (z. B. der vielen Waschmitteln beige-setzte optische Aufheller an weißem Baumwollstoff, Fluoreszenzfarbstoffe, manchen Papieren zugesetztes weißes Pigment, Mineralien) zum Leuchten an.



Fluoreszierendes Sperma

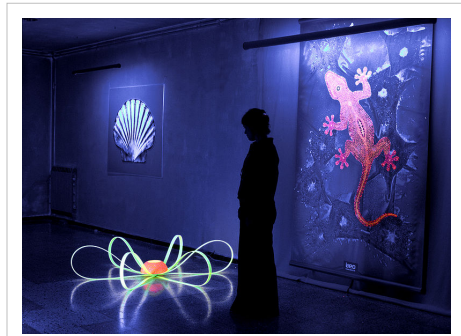
Man verwendet es auch für Schwarzlichttheater und in der Mineralogie.

Eine weitere Anwendung ist das Sichtbarmachen von Sicherheitsmerkmalen, u. a. auf Dokumenten (z. B. Ausweispapiere, Fahrscheine) oder Zahlungsmitteln (z. B. Euro-Scheine) sowie „Neon-Stempel“ als „Eintrittskarte“ in ein Konzert.

Schulungen

UV-Strahlung wird in Schulungen zur Visualisierung von mit Fluoreszenzfarbstoffen markierten Substanzen eingesetzt:

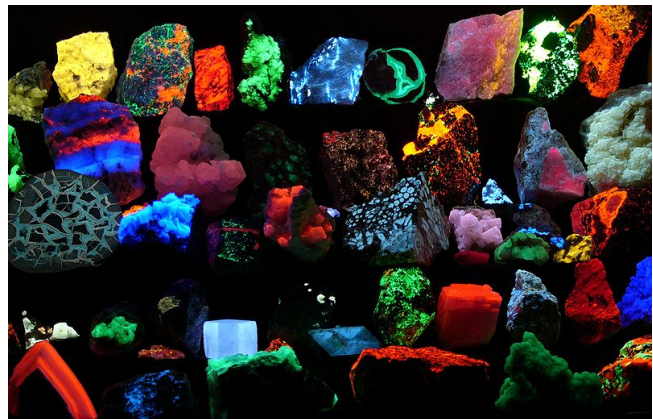
- Applikationskontrolle von Hautschutzmitteln bei der Persönlichen Schutzausrüstung (PSA)
- Demonstration von Kreuzkontamination (Keimübertragung) innerhalb von Hygiene-Schulungen
- Visualisierung bei der Händehygienschulung (Waschkontrolle und Applikation von Handdesinfektionsmittel)



Kunst mit fluoreszierenden Materialien.

Analysen

- Optische Spektroskopie:
UV/VIS-Spektroskopie
- Auswertung der Chromatogramme in der
Dünnschichtchromatographie
- Gas-Analyse (NO , NO_2 , H_2S , SO_2)
- Molekularbiologie: Sichtbarmachen von
Nukleinsäuren mit Hilfe von Ethidiumbromid
- Bestimmung der Fettschichtdicke: Punkte, bei
denen Reibung zwischen zwei Objekten
entsteht, sind häufig gefettet. Mit Hilfe von
UV-Strahlung lässt sich bestimmen, ob und wie
dick eine Fettschicht auf den Objekten ist.
- Bestimmung der Zinnseite von Floatglas
(Fotovoltaik, Dünnschicht-Solarzellen)



Eine Sammlung von Mineralproben leuchtet hell in verschiedenen Farben bei Bestrahlung mit UV-Licht

Materialprüfung

- Inspektion von Glas(scheiben): Anhand von Fluoreszenz an Störungen kann man Sprünge oder Fehler in Glasoberflächen erkennen.
- Prüfen von Ölschläuchen: Aufgrund der unterschiedlichen spektralen Kennlinien von Wasser und Öl im UV-Bereich kann Öl von Wasser unterschieden werden. Das kann beispielsweise zum Aufspüren defekter Ölschläuche verwendet werden.
- Erkennung bzw. Klassifizierung von Beschichtungen (z. B. zur Erkennung von Öl in Wasser)
- Inspektion von Oberleitungs- und Hochspannungsanlagen: Bei defekten Isolatoren oder angerissenen Kabeln kommt es zu sogenannten Koronaentladungen. Dabei wird an den defekten hochspannungsführenden Komponenten UV-Strahlung emittiert. Diese kann von Spezialkameras erfasst werden.
- Untersuchung von Hauterkrankungen: Pigmentstörungen der Haut können mit Hilfe von UV-Strahlern ("Wood-Licht") besser sichtbar gemacht werden. Auch bestimmte Hautkeime (*Corynebacterium minutissimum*) werden mittels dieser Diagnoseleuchten durch die Auslösung einer rötlichen Fluoreszenz (Porphyrinbildung) sichtbar.

- Belastbarkeits- und Bewitterungstests: Prüfung der Belastbarkeit von Materialien, die besondere Langlebigkeit erfordern (z.B. Materialien, die in der Automobilindustrie verwendet werden, Solarzellen etc.). Mithilfe moderner Testsysteme ist möglich, die natürliche UV-Einstrahlung so zu verstärken, dass innerhalb von 12 Monaten 63 Jahre natürlicher UV-Einstrahlung simuliert werden.^[7]

Aushärtung (Vernetzung) von Polymeren

- Druckindustrie: zur Härtung („Trocknung“) von speziellen, lösemittelfreien, UV-empfindlichen Druckfarben, vor allem beim Offsetdruck.
- Lackierereien: zur Aushärtung UV-härtbarer Lacke
- Zahnheilkunde: lighthärtende Materialien
- Aushärten strahlenhärtender Klebstoffe
- Optikindustrie: zur Härtung von optischen Erzeugnissen (z. B. Rezept-Brillengläser)

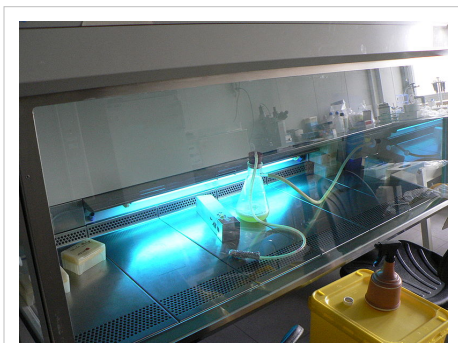
Elektronik/Fotolithografie

- Löschen von EPROM-Speichern (253,7 nm, Quecksilberdampf Lampe); Freisetzung von Ladungsträgern und dadurch Entladung von in Siliziumdioxid „vergrabener“ Ladungen
- Belichtung von fotobeschichteten Leiterplatten und Frontplatten (Fotolithografie, 253,7 nm, Quecksilberdampf Lampe): Positivlack zersetzt sich und wird löslich, Negativlack vernetzt und wird unlöslich.
- Fotolithografie bei der Herstellung integrierter Schaltkreise (Waferbelichtung, Maskenherstellung); Verwendung immer kürzerer Wellenlängen bis in den VUV-Bereich (Quecksilberdampf-Höchstdrucklampe, Excimerlaser, andere Quellen)

Biologische Modifikationen

Desinfektion

Ultraviolette Strahlung wird zur Behandlung von Wasser, Luft und Oberflächen eingesetzt. Aufgrund der Geschwindigkeit der Reaktion – Mikroben werden bei ausreichender Dosis innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde inaktiviert – können UV-Strahler nicht nur zur Desinfektion von Oberflächen, sondern auch zur Desinfektion von Wasser, Luft oder sogar in Klimakanälen geführten Luftströmen eingesetzt werden. Vor der Entwicklung von Laminar-Flow-Anlagen für Reinräume, sowie dem heute üblichen und massiven Einsatz von Desinfektionsmitteln, waren daher in Krankenhäusern im Dauerbetrieb arbeitende schwache Ultraviolettstrahler üblich um die Keimzahl gering zu halten. Die zunehmende Antibiotika-Resistenz krankenhausspezifischer Keime könnte dabei in naher Zukunft zu einem Revival der altbekannten Technik führen, da sich bei der UV-Desinfektion keine mutationsbedingten Resistenzen entwickeln können.



Eine Niederdruck-Quecksilberdampföhre ist in einen Abzug montiert und entkeimt so die bestrahlten Flächen mit kurzwelliger UV-Strahlung.

Eine heute bereits recht verbreitete Methode ist die Trinkwasseraufbereitung mit UV-Strahlung. Dabei wird die Keimzahl im Wasser zuverlässig und in Abhängigkeit zur Dosis stark reduziert. Eine Zugabe von Chemikalien ist grundsätzlich nicht erforderlich. Gerade chlorresistente Krankheitserreger, wie etwa Cryptosporidien, können mit UV-Strahlung inaktiviert werden. Geschmack, Geruch oder der pH-Wert des Mediums werden nicht beeinflusst. Das ist ein wesentlicher Unterschied zur chemischen Behandlung von Trink- oder Prozesswasser.

Im allgemeinen kommen bei der UV-Desinfektion Niederdruck-Quecksilberdampflampen zum Einsatz (ggf. auch Mitteldruckstrahler), welche Strahlung der Wellenlänge 254 nm emittieren. Kürzere Wellenlängen (< 200 nm)

können alle in Wasser befindlichen organischen Stoffe (TOC) zerlegen und werden zur Herstellung hochreinen Wassers benutzt.

Weitere Anwendungen

- Inaktivierung von Viren bei 254 nm
- Chemie, Pharmazie: Photochemie, z. B. Synthese von Calciferol (Vitamine D₂ und D₃)
- Wellness: Bräunung der Haut Solarium
- Therapie mit UV-Strahlung (vorrangig UV-A); Tageslicht enthält Strahlung mit wenig UV-B und ohne UV-C.
Wirkung: Pigmentation, Vitamin-D-Bildung, Anregung des Zentralnervensystems, je nach Dosierung.
- Chlorfreie Bleichung von Zellstoff
- Wasseraufbereitung im Schwimmbad zum Abbau von Chloraminen.

Lockmittel

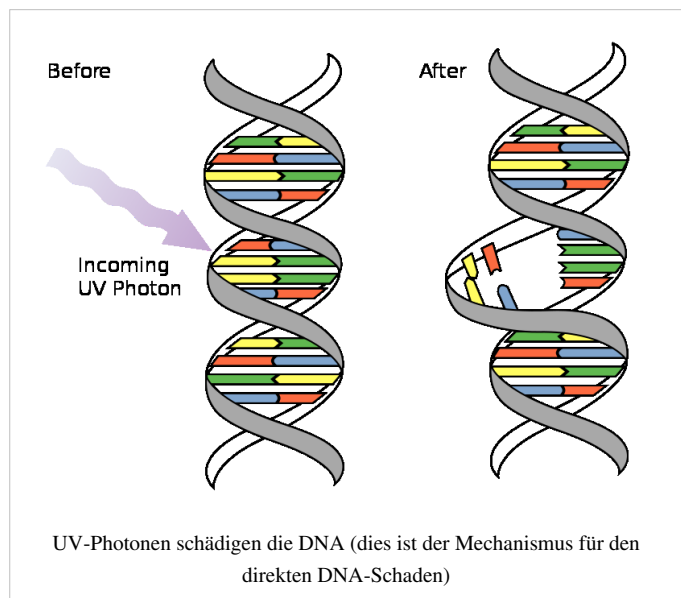
Pflanzen locken durch bestimmte Blütenteile (UV-Male) Insekten an. Einige Tiere, wie z. B. Bienen und Hummeln, können im UV-Bereich sehen. Blüten haben zwischen innen und außen oft eine andere Reflektivität für Ultraviolett. Dadurch finden Bienen auch bei im sichtbaren Bereich einfarbig aussehenden Blüten das Zentrum.

In Lichtfallen für den Insektenfang werden UV-reiche Lichtquellen eingesetzt. Lichtfallen werden zur Schädlingsbekämpfung und zur Zählung/Artbestimmung in der Forschung eingesetzt.

Straßenlampen mit hohem Blau- und Ultraviolettanteil (Quecksilberdampflampen) locken Insekten an und beeinflussen das biologische Gleichgewicht. Undichtigkeiten führen zu erhöhtem Wartungsaufwand. Von umherfliegenden Insekten werden Fledermäuse angelockt und können durch den Straßenverkehr verunglücken.

Schäden durch Ultraviolettstrahlung

- UV-B Strahlung verursacht hauptsächlich direkte DNA-Schäden. Diese verursachen Sonnenbrand (Erythembildung an der Haut) und vermehrte Melaninproduktion.
- UV-A Strahlung verursacht hauptsächlich indirekte DNA-Schäden und Melanome
- Denaturierung von Zelleiweiß
- Augenlinsentrübung: Hohe UV-B-Dosen führen zur Linsentrübung.
- Hohe UV-Einstrahlung auf die Lippen kann zu Herpes führen.
- Schädigung von Kunststoffen, Farbpigmenten und Lacken. Organische Farben bleichen aus, Kunststoff trübt sich ein und wird spröde (Beispiel: Zerfall von Polyethylen-Folie bereits bei Tageslichteinfluss, Versprödung und Verfärbung von Kunststoffen in Leuchten für Gasentladungslampen). Schutz ist durch resistente Pigmente oder geeignete Materialwahl möglich.
- Zerstörung von Vegetation: Im UV-C-Bereich haben Pflanzen fast keinen Schutz. Blätter werden bei Bestrahlung in diesem Bereich schwer beschädigt oder abgetötet. Letzteres kann auch zum Absterben der gesamten Pflanze führen. UV-A und UV-B wird von Pflanzen unterschiedlich vertragen, hohe Intensitäten führen zum Absterben, an UV-A können sich Landpflanzen „gewöhnen“.



- Ultraviolett erzeugt aus sogenannten Vorläufersubstanzen (Abgase) bei hoher Sonneneinstrahlung auch bodennah Ozon, welches lungenschädigend und pflanzenschädigend wirkt (Smog).
- Das Lichtbogenschweißen ist eine intensive Ultraviolettquelle, Schweißer und umstehende Personen müssen sich schützen.
- Raumfahrt: Intensives UV-B und UV-C erfordern besondere Materialien, besonders für die Raumanzüge und deren Visiere zum Außeneinsatz. Außerhalb des „UV-Filters“ der Erde befindliche Solarzellen werden geschädigt und haben eine geringere Lebensdauer als auf der Erde.

Siehe auch

- EUV-Strahlung
- Sonnenbad
- Sonnenbrennerbasalt
- Ultraviolett-Photoelektronen-Spektroskopie (UPS)
- Ultraviolettastronomie
- UV-Behandlung bei Hauterkrankungen (Psoriasis, Vitiligo, Neurodermitis)
- VUV-Strahlung (Vakuum-Ultraviolett-Strahlung)
- Ozonloch

Weblinks

- FIGAWA-Arbeitsblatt: Einsatz von UV-Geräten zur Schwimm- und Badebeckenwasserbehandlung ^[8]
- UV-Lampen in der Praxis ^[9]

Einzelnachweise

- [1] P. E. Hockberger: *A history of ultraviolet photobiology for humans, animals and microorganisms*. In: *Photochem. Photobiol.* 76. 2002, S. 561–579 (http://www.ncbi.nlm.nih.gov/sites/entrez?cmd=Retrieve%5C&db=pubmed%5C&dopt=Abstract%5C&list_uids=12511035).
- [2] Innsbrucker Nachrichten, 15. Februar 1902
- [3] Addressing the health benefits and risks, involving vitamin D or skin cancer, of increased sun exposure, Johan Moan et al, PNAS 105:668-673; published ahead of print , DOI:10.1073/pnas.0710615105, (Proc Natl Acad Sci USA 105, 2008, 668), zitiert nach Ärzte Zeitung, 2. Oktober 2008, S. 3, Strikte Warnung vor Sonne könnte aufgeweicht werden, UV-Licht erhöht Spiegel an krebsschützendem Vitamin D
- [4] Ärzte Zeitung, 2. Oktober 2008, S. 2, Lieber Sonne als Krebs, Angela Speth
- [5] *Powerful Skin Cancer Protection by a CPD-Photolyase Transgene*. In: *Current Biology*, Vol. 15, Issue 2. 2006, S. 105-115 PMID: 15668165.
- [6] Fiedler A., Benecke M. et al.: *Detection of Semen (Human and Boar) and Saliva on Fabrics by a Very High Powered UV-VIS-Light Source*. In: *Open Forensic Science Journal* 1. 2008, S. 12-15 (http://wiki.benecke.com/index.php?title=2008_The_Open_Forensic_Science_Journal:_Detection_of_Semen_%28Human_and_Boar%29_and_Saliva_on_Fabrics_by_a_Very_High_Powered_UVIS-Light_Source). Forensischer Artikel zur Anwendung von UV-Licht zur Erkennung von Sperma
- [7] 63 Years of UV Exposure in 1 Year (http://www.atlas-mts.de/de/news/atlas_news/63_years_of_uv_exposure_in_1_year_68243.shtml)
- [8] http://www.figawa.de/download/figawa.de/fb_wasser/fg_wasseraufbereitung/ak_uv-wasserbehandlung/dokumente_ak_uv-wasserbehandlung/2009-08-25_einsatz_von_uv-geraeten/
- [9] <http://blog.mineralium.com/uv-lampen-in-der-praxis/>

Vierfarbdruck

Der **Vierfarbdruck** ist eine in allen modernen Druckverfahren angewandte Technik zum Erstellen farbiger Abbildungen.

Übersicht

Das Druck-Bild wird dabei durch subtraktive Farbmischung aus den vier genormten Grundfarben aufgebaut:

Vierfarbendruck

1. Erste Farbplatte: Gelb.
2. Zweite Farbplatte: Rot.
3. Erste und zweite Farbplatte zusammengedruckt.
4. Dritte Farbplatte: Blau.
5. Erste, zweite u. dritte Farbplatte zusammengedruckt.
6. Vierte Farbplatte: Schwarz.
7. Erste, zweite, dritte und vierte Farbplatte zusammengedruckt.

Beispiel für eine Abbildung im Vierfarbendruck (Bild 3 und 5 zeigen Zwischenschritte)

Normfarbe	Bezeichnung	Farbton	Pigmentgruppe
	Cyan	Helio-Echtblau	auf Basis Phthalocyaninblau
	Magenta	Purpurton	auf Basis eines Rhodamin-B-farblacks, auch Dioxazinviolett
	Yellow	Gelb	druckbeständige Gelbpigmente: Hansagelb, Permanentgelb, Pigment Yellow 151. ^[1]
	Key	Schwarz	Farbruß, geschönt mit Reflexblau

Drei Idealfarben Gelb, Magenta, Cyan würden ausreichen. Wegen physikalisch bedingter Form und Lage des Spektrums von technisch und ökonomisch verfügbaren Farbpigmenten ist aus C-M-Y allein kein Tiefschwarz, Farbtiefe, zu drucken.

Als vierte Druckfarbe wird für die „Tiefe“ zusätzlich Schwarz auf Basis von Farbruß verwendet. „K“ steht für Key (Schlüssel), da es die Schlüsselfarbe für den farblichen Kontrast ist. Die Wortherkunft entstammt der analogen Filmseparation. K wird in der deutschen Fachumgangssprache mitunter für Kontrast gedeutet.

Das Farbsystem wird als CMYK-Farbmodell bezeichnet. Die vier genormten Farben sind als Farbskala nach ISO 12647 und ISO 2846 definiert. Im europäischen Raum ist neben ISO-Skala noch die Bezeichnung Euroskala gebräuchlich.

Verfahren

Ausgehend von der Originalabbildung müssen zunächst *Farbauszüge* erstellt werden.

In der herkömmlichen Druckvorstufe wird dabei die Vorlage nacheinander durch Farbfilter auf vier getrennte Filme belichtet, so dass auf dem ersten Film nur die Cyan-Anteile des Bildes erscheinen, auf dem zweiten nur die Magenta-Anteile usw.

Diese Farbauszüge müssen (entweder im gleichen Arbeitsgang oder anschließend) noch aufgerastert werden.

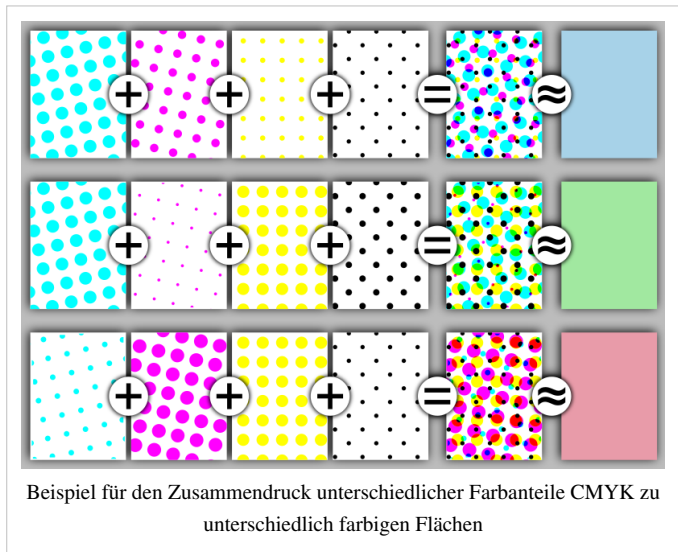
Das Halbtonbild wird dazu durch einen Glasgravur- oder Kontaktraster belichtet und dabei in kleine Bildpunkte zerlegt. Die Form dieser Rasterpunkte kann je nach Aufbau des

verwendeten Rasters variieren von quadratisch über rund, elliptisch und rautenförmig. Der Mittenabstand der Rasterpunkte ist innerhalb eines Bildes stets identisch, aber ihre ausgefüllte Fläche variiert je nach zu druckender Farbtintensität von "Punkt nicht vorhanden" bis "Punkt füllt die gesamte Fläche aus". Diese Art der Rasterung wird auch als amplitudenmodulierte Rasterung bezeichnet. Die Rasterung ist notwendig, da die mit vier Farben im Druckpunkt entweder „Farbe“ oder „keine Farbe“ gedruckt werden kann. Das Druckverfahren erlaubt Abstufungen nur nebeneinander nicht durch stärkeren Auftrag am gleichen Ort.

Als Beispiel stelle man sich einen Graukeil vor, der vom reinsten Weiß bis zum tiefsten Schwarz reicht. Alle diese Grautöne müssen nun mit der einen Druckfarbe Schwarz auf Papier gebracht werden. Dadurch, dass bei helleren Grautönen die Rasterpunkte kleiner ausfallen (beziehungsweise weniger gehäuft gedruckt werden) als bei dunkleren Tönen, entsteht bei geeignetem Betrachtungsabstand der optische Eindruck einer grauen Fläche, obwohl die Punkte in Wirklichkeit alle aus demselben Schwarz gedruckt sind. Wenn man ein Foto in einer Zeitung oder Illustrierten mit einer Lupe betrachtet, kann man die einzelnen Rasterpunkte sehr gut sehen.

Um einen Moiré-Effekt im Druck zu vermeiden, werden die Rasterfolien vor der Belichtung jeweils um einen festgelegten Winkel, den *Rasterwinkel*, gedreht. Die Winkel im standardmäßigen Offsetdruck sind: Cyan 15°, Magenta 75°, Yellow 0° und Schwarz 45°. In besonderen Fällen (so zur Reproduktion von Hautfarben) können diese Winkel auch getauscht werden. In der modernen digitalen Druckvorstufe werden diese Aufgaben von einem Computer wahrgenommen, dem sog. RIP (Raster Image Processor). In der Druckmaschine durchläuft das Papier nacheinander Druckwerke mit den vier Farben. Die Reihenfolge der Farben ist abhängig von Auftrag und Druckverfahren. Im Vierfarb-Offsetdruck ist die Reihenfolge Schwarz, Cyan, Magenta, Gelb die Regel.

In einer echten Vierfarben-Druckmaschine sind vier komplette Einfarben-Druckmaschinen hintereinander geschaltet. In kleineren Hausdruckereien ist oft nur ein Druckwerk vorhanden, so dass nach dem Druck der ersten Farbe die Maschine komplett gereinigt und auf die zweite Farbe umgestellt werden muss. Damit sich die Drucke der einzelnen Farben auch sauber decken, werden außerhalb des eigentlichen Druckbereiches Passerkreuze mitgedruckt. Durch Verstellen des Längs- und Querregisters im jeweiligen Druckwerk können die vier Farben passgenau übereinander gedruckt werden. Ferner werden über die gesamte Breite des Druckbogens oder der Papierbahn noch Messfelder gedruckt, die dem Drucker dabei helfen, das Farbwerk der Maschine richtig einzustellen. Passkreuze und Messfelder werden normalerweise nach dem Druck weggeschnitten. Beim Verpackungsdruck können sie oft belassen werden, da sie nach dem Zusammenkleben der Verpackung (etwa bei Zigarettenschachteln) unter einer Decklasche verschwunden sind.



Weitere Mehrfarbendrucke

Neben dem Vierfarben- gibt es weitere Mehrfarbendrucke. Dabei können neben den vier Grundfarben, die durch subtraktive Farbmischung die Prozessfarbe ergeben, noch sogenannte Schmuckfarben verwendet werden. Dies ist dann notwendig, wenn sich eine durch das *Corporate Design* vorgegebene Hausfarbe nicht sauber und reproduzierbar aus den Normfarben aufbauen lässt, oder wenn diese Hausfarbe (etwa in einem Logo) nicht gerastert, sondern im Vollton gedruckt werden soll. Auch spezielle Farben wie Gold oder Silbertöne und Leuchtfarben lassen sich (nur) so drucken.

Seltener werden Verfahren angewandt, die den vier Grundfarben noch weitere Buntfarben hinzufügen, um den darstellbaren Farbraum des Vierfarbdrucks zu vergrößern, wie unter dem geschützten Markenzeichen Pantone Hexachrome. Das Hexachromeverfahren arbeitet mit sechs Druckfarben: Cyan, Magenta, Yellow, Orange, Grün und Schwarz. Diese Drucktechnik ist mit erhöhten Kosten und arbeitstechnischem Aufwand verbunden, die aber in bestimmten Situationen für bessere Druckergebnisse notwendig werden.

Literatur

- Harald Küppers: *Die Farbenlehre der Fernseh-, Foto- und Drucktechnik*. Farbentheorie der visuellen Kommunikationsmedien. DuMont Literatur und Kunst Verlag, Köln 1985.
- Harald Küppers: *DuMont Farbenatlas*. Über 5500 Farbnuancen mit digitalen Farbwerten, Kennzeichnung und Mischanleitung. Erklärung der Standardisierungskonzeption im Offsetdruck. DuMont Literatur und Kunst Verlag, Köln. 10.Auflage 2007.

Weblinks

- Farblehre im Druck ^[10]

Einzelnachweise

[1] Hansagelbe (<http://www.kremer-pigmente.com/23300.htm>)

Violett

Violett

Violett ist eine Farbe. Sie umfasst jene Farbreize, deren Absorptionsmaximum am kurzwelligen Ende des sichtbaren Lichtes vom UV bis etwa 425 nm heranreicht^[1]. Licht mit dieser Eigenschaft kann auch als Körperfarbe remittiert sein. Im normalen Sprachgebrauch werden die Farbnamen Violett und Lila überdeckend für Farbtöne zwischen Rot und Blau genutzt. Violett ist der „reine kurzwellige“ Farbreiz, während Lila eine gebrochene Farbe im Rotblau beschreibt.

Etymologie

Der Begriff Violett ist dem französischen Begriff für Veilchen (violette) entlehnt. Im Lateinischen gibt es den Begriff "violaceus", der laut Langenscheidt aus einer Mittelmeersprache in das Lateinische als Fremdwort eingewandert ist. Es ist der Farbton des Veilchens (Viola).

Der Begriff Lila wurde während der Kreuzzüge aus dem Sanskrit über das Persische und das arabische Wort für Flieder (lilak) nach Spanien und von dort aus nach Frankreich gebracht. Aus dem daraufhin entwickelten französischen Lehnwort "lilas" (Flieder) entwickelte sich schließlich durch phonetische Transkription das deutsche Wort.

Der Begriff Magenta geht auf die Schlacht von Magenta, einer norditalienischen Stadt, zurück.

Für die violetten Farbtöne, also die zwischen Rot und Blau, gibt es mehrere Wörter, die sich in der Bedeutung etwas unterscheiden.

Die Farbe Violett grenzt im Farbkreis an Purpur, auch dunkles Purpur genannt.

Die Farbe Lila ist helleres Violett, veraltend auch mittleres Purpur genannt

Die Farbe Magenta ist helleres Lila, veraltend auch helles Purpur genannt.

Die Modefarbe Pink ist das grelle, verweißlichte (pastelle) Violett.

Trotz des sehr unterschiedlichen Eindrucks der violetten Farbtöne ist die Anwendung der Wörter für diesen Farbbereich im Alltag uneinheitlich. Meist werden Mischfarben von Rot oder Blau angegeben, bläuliches Rot oder rötliches Blau, sogar als Rotblau.

Farblehre

Spektrales Violett

Die Spektralfarbe Violett entspricht einer Wellenlänge von 460 bis 390 Nanometern^[2], liegt also am kurzwelligen Ende des sichtbaren Spektrums. Mit Fernseh- und Computermonitoren ist es wegen fehlender Leuchtstoffe nicht darstellbar. Spektrales Violett sieht man in einer CD, in der sich eine kräftige Lichtquelle spiegelt, da an der Oberfläche eine Beugung erfolgt.

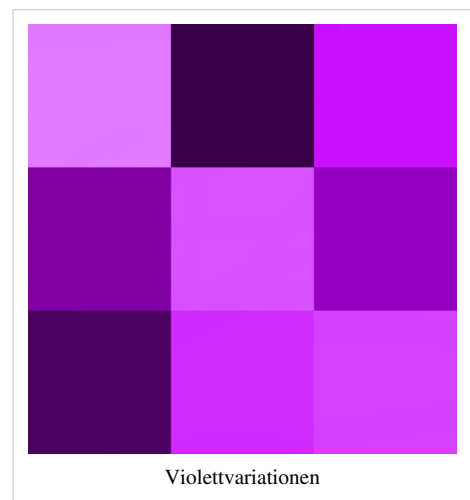
Diese Muster können nur Anhaltspunkt für die Unterscheidung der Farbtöne sein.

Violett, die Veilchenfarbe

Violett

Farbcode: #8B00FF

Lila, die Fliederfarbe (Fliederviolett)



Lila

Farbcode: #9932CC

Magenta

Magenta

Farbcode: #8B008B (dunkles Magenta)

Indigo ist ein früher üblicher Name für Violett und beschreibt als Spektralfarbe den Bereich zum Blau.

Pink tendiert deutlich zum Rot und liegt im CIE-Farbsystem auf der Purpurgeraden. Purpur ist dabei die Mischfarbe aus roten und blauen Farbmitteln, der keine Spektralfarbe zukommt.

Wiederum ist auch Magenta ein Farbton aus dem Purpurbereich. Bei Ostwald heißt das heutige Magenta des CMY-Systems noch Veil und ist jene Optimalfarbe, die er als Mittelfehlfarbe bezeichnet, weil es die Komplementärfarbe zu Grün ist.

Gemischtes Violett

Violett ist die Bezeichnung der Spektralfarbe am kurzwelligen Ende, die sich an das Indigo anschließt. Genau in diesem Sinn ist Violett eine monochromatische Spektralfarbe. Purpur ist dagegen eine Mischfarbe, Bezeichnung der Farbvalenz aus rotem und violetter Farbreiz. Die intensivsten Purpurtöne bilden die „Purpurlinie“ des CIE-Chromatizitätsdiagramms. Purpur ist der Farbton, der zum „königlichen“ Farbstoff aus der Purpurschnecke gehört.

Violett wird als Farbname auch für die Sekundärfarbe in der additiven Farbmischung genutzt, wenn Licht der Primärfarbe Blau mit Rot zusammentrifft. Richtiger ist es hierfür die Bezeichnung Magenta zu nutzen.

Weiterführende Erläuterungen finden sich im Artikel Magenta und Purpur.

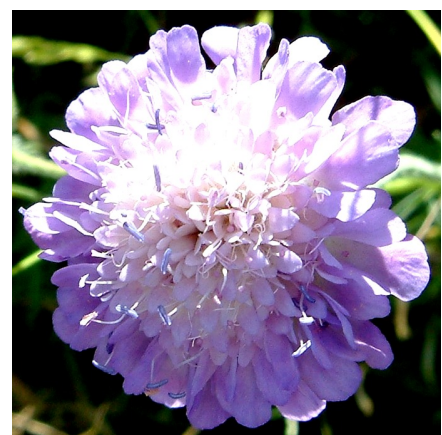
Im RAL-Nummern-Farbkatlog gibt es einen eigenen Farbbereich 4xxx *Violett*, derzeit von Farbe 4001 *Rotlila* über Farbe 4006 *Verkehrspurpur* bis Farbe 4010 *Telemagenta*, der Telekom-„Identity Color“. Allerdings gehört auch die RAL-Farbe 5000 *Violettblau* im blauen Bereich dazu.

Farbstoffe

Violett tritt in der Natur auf. Lange Zeit war es aber nicht möglich, einen beständigen Farbstoff herzustellen, wie er zum Färben von Textilien benötigt wird. 1856 gewann William Henry Perkin zufällig den ersten künstlichen Farbstoff Mauvein, indem er Steinkohleteer untersuchte. Zwei Jahre später gelang August Wilhelm von Hofmann die Gewinnung des Farbstoffs Fuchsin.



Violett, wie es in der Natur auftritt



Lila Blüten

allgemeine Symbolik

Der Zwischenton von Rot und Blau wird als geheimnisvoll gedeutet. Dabei steht diese Farbe für einsam und aus dieser Sicht auch für kreativ, allerdings für unbefriedigt und dann wiederum aphrodisierend. Violett mit seinen Farbnuancen die Zwischentöne des kalten Blau und des warmen Rot gelten als phantasievoll, empfindsam, intuitiv und außergewöhnlich. In der Farbberatung wird es empfohlen, um Selbstvertrauen und Individualität auszudrücken, für alle Gelegenheiten, wo Diplomatie gefragt ist. Diese Farbtöne wirken charmant und verführerisch.

Religion

- In der christlichen Kirche ist Violett die liturgische Farbe für Advent und Fastenzeit.
- Im Glauben ist es die Farbe der Besinnung, der Buße, der Einkehr und Umkehr.
- geistlich, aber auch mystisch
- Durch die Anwendung in der Kleidung der hohen christlichen Würdenträger ist die Bedeutung der Würde ergründet.
- In den nationalsozialistischen Konzentrationslagern wurden die wegen ihres Glaubens inhaftierten Bibelforscher (heute: Zeugen Jehovas) mit einem „violetten Winkel“ markiert. Das auf der Spitze stehende Dreieck wurde zur Kennzeichnung der Regimegegner genutzt, Violett stand für Widerstand aus Glaubensgründen.

[3] [4]

Politik

- Die Partei Die Violetten hat Violett als namensgebend gewählt, weil die Partei und die Farbe für Spiritualität stehen.

Frauenbewegung

Als Ausdruck von Frauenliebe und Unabhängigkeit (Freiheit) werden rot-blaue Farben erstmals von der auf der griechischen Insel Lesbos lebenden antiken Lyrikerin Sappho erwähnt. Seit der Herstellung der ersten Stoffe mit dem neu entdecktem künstlichen Farbstoff wurde das blasse „Mauve, or violet colored silk“ ^[5] zwischen 1858 bis 1869 als Modefarbe der besseren Leute namentlich erwähnt. ^[6]

Auch berühmte Frauen beeinflussten mit Kleidungsstücken dieser Farbe die Modewelt. Im 19. Jahrhundert wurde die Farbe für die Frauenbewegung neu entdeckt. Lila als Mischung zwischen Rosa (weiblich) und Blau (männlich) gilt als Symbol für Gleichstellung zwischen den Geschlechtern. Schon die Plakate der ersten internationalen Frauentage wurden in Lila gehalten. In den "Goldenen 1920er Jahren" kam die Farbe in Mode und in den 1970er Jahren war es für Feministinnen ein Muss, lila gekleidet zu sein. Viele frauenpolitische Projekte bekamen einen Namen, in dem das Wort Lila enthalten ist.

Lila – Blau oder Rot

Bis ins Mittelalter gab es den Begriff „lila“ nicht, er wurde vermutlich über die Kreuzfahrer aus dem Orient überliefert. Bis dahin wurden lila-farbige Gegenstände je nach vorherrschendem Farbeindruck als Blau oder Rot eingeordnet. In den Sprachwissenschaften ist dies besonders markant an der regionalen Verbreitung der Begriffe *Rotkraut* und *Blaukraut* untersucht worden. Die jeweilige Form der Zubereitung des Farbkohls bestimmt den Farbton: Der Zusatz von konservierendem Essig bewirkt eine rötlich violette Färbung, während die ›süßere‹ süddeutsche Zubereitung zum bläulichen Violett des Blaukrautes führt.

„Lila“ ist eine Farbbezeichnung für ein mit weiß aufgehelltes Violett, also kein reiner Farbton und nicht zu verwechseln mit Violett, das zu den Sekundärfarben gehört. Umgangssprachlich wird jedoch „lila“ oft für „violet“ verwendet.

Das Wort „lila“ wird in Fibeln oft als erste Farbbezeichnung genutzt, da die bekannten Buchstaben anfangs begrenzt sind. So wird dieser blau-rote Farbton Kindern geläufig und als geschriebener Farbbegriff gefestigt.

Siehe auch

- Webfarbe
- Liste violetter Farbmittel

Weblinks

- Farbe des Monats - Assoziationen zur Farbe Lila ^[7]

Einzelnachweise

[1] Franz Wenzel: *AGFA-Lichtfilter*. fotokino-verlag, Halle 1957

[2] Das große Tafelwerk - Formelsammlung für die Sekundarstufe I und II, Cornelsen Verlag, Seite 112

[3] <http://www.triangoloviola.it/pdf/liw.pdf>

[4] <http://ausstellung.lilawinkel.de/>

[5] *Godey's Lady's Book and Magazine*

[6] Ann Buermann Wass: *Rivalling nature in the beauty and brilliancy of their coloring: Synthetic dyes and fashionable colors in Godey's Lady's Book and Magazine 1856-1891* (http://findarticles.com/p/articles/mi_qa3983/is_200012/ai_n8905150/pg_1), The Chronicle of the Early American Industries Association, Dezember 2000, bei findarticles.com

[7] <http://farbedesmonats.de/lila>



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Visuelle Wahrnehmung

In der Physiologie ist **visuelle Wahrnehmung** die Aufnahme und Verarbeitung von visuellen Reizen, bei der eine Extraktion relevanter Informationen, Erkennung von Elementen und deren Interpretation durch Abgleich mit Erinnerungen stattfindet. Somit geht die visuelle Wahrnehmung weit über das reine Aufnehmen von Information hinaus.

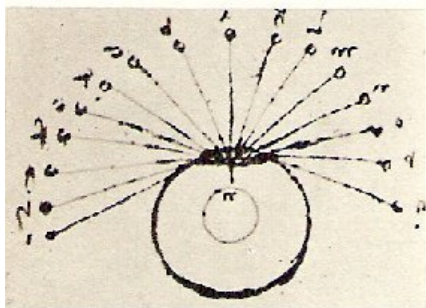
Physiologische Einzelheiten zum Wahrnehmungsapparat finden sich unter visuelles System.

Geschichte

Im Altertum existierten unterschiedliche Theorien über die visuelle Wahrnehmung:

Die Wahrnehmungstheorie von Euklid (365–300 v. Chr.) setzte sich mit Problemen der Raumwahrnehmung (z. B. Perspektive und Größenkonstanz) auseinander. Die Sehlinien gehen nach dieser Theorie vom Auge aus und bestimmen die Wahrnehmung. Diese Theorie des „Sehstrahls“ scheint im Lichte physikalischer Betrachtungen ziemlich absurd zu sein, erhält aber durch die modernen Erkenntnisse der Blickbewegungsanalysen eine Art späte Rehabilitation (siehe foveale Wahrnehmung).

Die Wahrnehmungstheorie von Empedokles (492–432 v. Chr.) besagte scheinbar das Gegenteil. Die von den Poren (heute würde man sagen Pigmente) der Dinge ausgehenden Einflüsse, eine Art von Strahlungen, die durch das Licht beeinflusst (heute würde man sagen reflektiert) werden, dringen in die Sinnesorgane ein, und werden wahrgenommen, wenn sie dort eine Entsprechung finden (Gleiches wird durch Gleiches erkannt). Auch diese Theorie, die sich mit dem Erkennen von Dingen der Außenwelt befasst, ist in ihrem Ansatz moderner als es scheint. Sie bezieht sich aus heutiger Sicht auf die periphere Wahrnehmung, die ja auch auf den Betrachter einwirkt, selbst wenn dieser gar nicht hinschaut.



Leonardo DaVinci: Das Auge hat eine einzige Zentrallinie und alle Dinge, welche durch diese Linie zum Auge gelangen, werden gut gesehen.

Alhazen oder *Ibn al-Haytham*, der „Vater der Optik“ (965–1040), bewies als Erster, dass die visuelle Wahrnehmung mit dem Licht zusammenhängt, das ins Auge fällt. Er stellte als erster die Hypothese auf, dass die Seh Wahrnehmung im Gehirn und nicht im Auge stattfindet.

Durch Versuche wies er nach, dass die Wahrnehmung durch die persönliche Erfahrung eines Menschen beeinflusst wird. ^[1] Al-Haytham führte Experimente über menschliche Wahrnehmung durch und ergänzte die Arbeiten des Ptolemäus über stereoskopisches Sehen. ^{[2] [3]}

Leonardo da Vinci (1452–1519) erkannte als Erster die optische Besonderheit des menschlichen Auges. Er schrieb: „Das Auge hat eine einzige Zentrallinie und alle Dinge, welche durch diese Linie zum Auge gelangen, werden gut gesehen. Das Auge, von welchem uns die Erfahrung so deutlich die Funktion offenbart, wurde von einer unendlich großen Anzahl von Autoren in einer bestimmten Weise beschrieben; ich aber finde, dass es ganz anders ist.“

Zu dieser Ansicht gelangte er durch Beobachtungen und mit Hilfe von optischen Experimenten. Damit ist er der Entdecker des Unterschieds zwischen fovealem und peripherem Sehen. ^[4]

Hermann von Helmholtz ^[5] wird oft als Vater der modernen visuellen Wahrnehmungstheorie betrachtet. Er verglich das Auge mit optischen Geräten und fand seine Konstruktionsmerkmale sehr primitiv. Theoretisch konnte das Auge gar keine brauchbaren Sehresultate liefern. Er schloss daraus, dass die Wahrnehmung nur durch „unbewusste Schlüsse“ zustande kommen könne, die durch bereits vorhandene Wahrnehmungserfahrungen ermöglicht werden.

Solche Wahrnehmungserfahrungen sind z. B.:

- Licht kommt gewöhnlich von oben
- Gegenstände werden nicht von unten gesehen
- Gesichter werden in aufrechter Position erkannt ^[6]

Das Studium der optischen Täuschungen hat gezeigt, welche unbewussten Schlüsse im Wahrnehmungsvorgang enthalten sein können.

Eine andere Art unbewusster Schlüsse basiert auf der Wahrscheinlichkeitsempfindung, welche durch die Häufigkeit bereits gemachter ähnlicher Wahrnehmung bestimmt wird. ^[7]

Wahrnehmungsprozess

Reizaufnahme

Durch den optischen Apparat des Auges wird auf der Netzhaut ein seitenverkehrtes und auf dem Kopf stehendes Bild erzeugt. Die Lichtreize werden von den Sinneszellen der Retina, den Stäbchen (Helligkeit) und Zapfen (Farbsehen), registriert. Das Verhältnis der Zelltypen unterscheidet sich je nach Ort auf der Netzhaut; in der Fovea befinden sich ausschließlich Zapfen. Zapfen und Stäbchen bilden bei Lichteinfall ein Membranpotenzial, das über bipolare Zellen an Ganglienzellen weitergeleitet wird.

Weiterleitung und Encodierung

Jede Ganglienzelle verarbeitet Informationen aus einem rezeptiven Feld (einem räumlich begrenzten Bereich der Retina). Es gibt zwei Haupttypen von Ganglienzellen, On- und Off-Center-Zellen, welche vor allem bei der Kantendetektion eine wichtige Rolle spielen. On-Center-Zellen sprechen an, wenn Licht in das Zentrum des rezeptiven Feldes fällt und senken ihre Feuerrate, wenn periphere Bereiche des Feldes stärker belichtet werden. Off-Center-Zellen verhalten sich genau andersherum und feuern verstärkt, wenn Lichtreize in Randbereichen des rezeptiven Feldes aufgenommen werden.

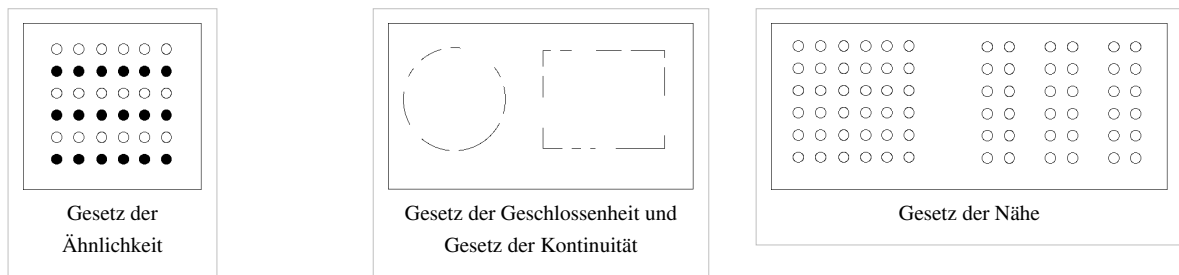
Die Informationen von den Ganglienzellen werden über die Sehbahn zum linken und rechten seitlichen Kniehöcker geleitet. Der Output der On- und Off-Center-Zellen wird in den Seitlichen Kniehöckern so verschaltet, dass Kanten (also Bereiche, in denen ein Helligkeitswechsel stattfindet) oder Balken (Helligkeitswechsel und Rückkehr zur Ausgangsintensität) extrahiert werden. Die aufbereiteten Informationen werden von den seitlichen Kniehöckern auf den visuellen Cortex projiziert.

Interpretation

Raumwahrnehmung

Die Raumwahrnehmung stützt sich auf mehrere Verfahren um aus dem zweidimensionalen Bild auf der Netzhaut eine Repräsentation der dreidimensionalen Welt zu erstellen. Durch das stereopskope Sehen können Rauminformationen aus den leichten Unterschieden zwischen den vom Augenpaar aufgenommenen Bildern konstruiert werden. Bewegt sich der Betrachter relativ zu Gegenständen im Raum, so bewegen sich die Abbilder auf der Netzhaut umso langsamer, je weiter der Gegenstand vom Betrachter entfernt ist. Daneben kann räumliche Wahrnehmung über den Texturgradienten stattfinden, d.h. über die Veränderungen der Textur je nach räumlichen Abstand.

Objektextraktion



Bevor Objekte erkannt und interpretiert werden können, muss erst aus den Informationen extrahiert werden, wo sich Objekte befinden und welche der erkannten Linien zu einem Objekt gehören. Diese **Gestaltgesetze** funktionieren alle nach dem Prinzip eine möglichst prägnante Lösung zu finden:

- **Prägnanz:** Eine Figur wird so wahrgenommen, dass sie einer möglichst einfachen Struktur entspricht
- **Nähe:** Bildelemente werden als zusammengehörig empfunden, wenn diese nahe beieinanderliegen
- **Ähnlichkeit:** Bildteile gleicher Form oder Farbe werden als Ganzes gesehen
- **Symmetrie:** symmetrische Strukturen werden dem gleichen Objekt zugeordnet
- **Gemeinsame Bewegung (Common fate):** Gleiche Bewegungen und gleichzeitiges Erscheinen oder Verschwinden von Bildelementen erzeugt eine Zusammengehörigkeit
- **Kontinuität:** Bildelemente, die eine Fortsetzung vorangehender oder unterbrochener Elemente zu sein scheinen, werden als zusammengehörig angesehen
- **Geschlossenheit:** Linien, die eine Fläche umschließen, werden unter sonst gleichen Umständen leichter als eine Einheit aufgefasst als diejenigen, die sich nicht zusammenschließen
- **Gemeinsame Region:** Elemente in abgegrenzten Gebieten werden als zusammengehörig empfunden
- **Verbundene Elemente:** Verbundene Elemente werden als ein Objekt wahrgenommen

Objekterkennung

In der Objekterkennung werden die extrahierten Objekte interpretiert und können mit Erinnerungen abgeglichen werden.

Abgleich an Merkmalen

Ein Objekt kann mit einer bestehenden Erinnerung durch eine Merkmalanalyse abgeglichen werden. In diesem Modell wird vorausgesetzt, dass eine Form oder ein Objekt in einen Satz abstrakter Merkmale repräsentiert wird. Der Buchstabe K hat z.B. die Merkmale „langer senkrechter Strich“ „kürzerer Strich mit ca 30° Neigung“ und „kürzerer Strich mit ca 75° Neigung“. Diese Modell ist dem eines Schablonen-Abgleichs dadurch überlegen, dass auch abgeänderte Muster erkannt werden. Beim „K“ können Größe, Lage, Rotation oder Schriftart geändert werden, sodass eine „Schablone“ nicht mehr passen würde. Unter all diesen Transformationen bleiben die Merkmale jedoch gleich. Zudem entspricht der Merkmalsabgleich der Encodierung durch die Ganglionzellen (Extraktion von Linien)^[8].

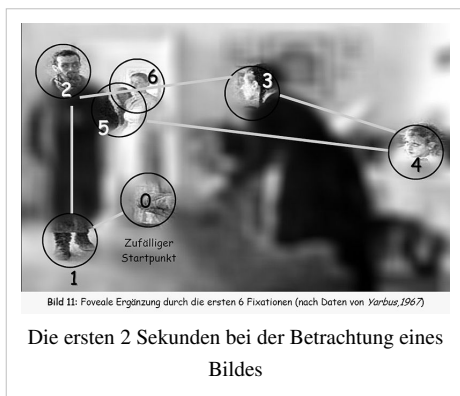
Erkennung komplexer Objekte

Zur Erkennung komplexer Objekte existiert die „Theorie der komponentialen Erkennung“ [9]

- Das komplexe Objekt wird in einfachere (dreidimensionale) Komponenten gegliedert, und jede Komponente einem „Geon“ (von: „Geometrical Icon“) zugeordnet. Geons sind ein Satz einfacher, dreidimensionaler Objekte, aus denen man durch Kombination komplexere Objekte erzeugen kann.
- Sind die Unterobjekte erkannt und deren Anordnung zueinander bestimmt, kann das Objekt zugeordnet werden.

Bei der Zuordnung findet das eigentliche Erkennen statt. Das Objekt wird eingeordnet und repräsentiert dann ein Objekt einer Kategorie (wie z.B. Zuordnung als „Hund“ oder „Telefon“)

Beispiele für Untersuchung der visuellen Wahrnehmung



In den Jahren nach 1960 wurden vermehrt Blickbewegungen aufgezeichnet und analysiert, z. B. beim Lesen von Texten [10] bei der Bildbetrachtung [11] und später auch beim Lösen visueller Probleme [12] und beim Autofahren. [13] Das Bild links zeigt, was in den ersten 2 Sekunden der Betrachtung eines Bildes geschehen kann. Der Hintergrund ist durch peripheres Sehen unscharf. Trotzdem kann man erkennen, dass es sich um eine Szene in einem Zimmer mit Personen handelt. Die erste Augenfixation zeigt ein paar Männerschuhe, vielleicht weil diese einen starken Kontrast aufweisen und außerdem sehr nahe bei der Grundposition der Augenfixationen liegen. Alle folgenden Fixationen springen von Gesicht zu Gesicht.

Man kann daraus schließen, dass das menschliche Gesicht im Normalfall die meiste Beachtung erhält, weil es eine Identifikation oder eine Beurteilung einer Person auf Grund biometrischer Ähnlichkeiten ermöglicht und so bereits eine erste Beurteilung einer zwischenmenschlichen Situation gestattet.

Eine wesentliche Tatsache: Die menschliche Wahrnehmung ist heuristisch und nicht linear d. h. es werden diejenigen Teile eines Bildes betrachtet, die zusätzliche Informationen enthalten, während subjektiv unwichtige oder bereits gut bekannte Bildelemente nicht fixiert werden (zusätzliche Beispiele *siehe Blickbewegungsregistrierung*).

Auf rechnerischer Ebene wurde von David Marr in der 1980er Jahren eine Theorie der Verarbeitung der Seheindrücke zur visuellen Wahrnehmung im Gehirn erstellt, die im Bereich der künstlichen Intelligenz ihre Anwendung findet. Diese Theorie wurde niemals experimentell überprüft.

Neurophysiologische Theorie

Eine neurophysiologisch orientierte Theorie der visuellen Wahrnehmung ist exemplarisch im Artikel Wahrnehmung dargestellt.

Verwandte Gebiete

- Psychophysik
- Neurowissenschaft
- Kognitive Psychologie
- Optometrie
- Ophthalmologie
- Unaufmerksamkeitsblindheit
- Veränderungsblindheit
- Imagination

- Response Priming

Quellen

- [1] Bradley Steffens (2006). *Ibn al-Haytham: First Scientist*, Chapter 5. Morgan Reynolds Publishing. ISBN 1-59935-024-6.
- [2] Howard, I: *Alhazen's neglected discoveries of visual phenomena*. In: *Perception*. 25, 1996, S. 1203-1217. doi: 10.1068/p251203 (<http://dx.doi.org/10.1068/p251203>).
- [3] Omar Khaleefa: *Who Is the Founder of Psychophysics and Experimental Psychology?*. In: *American Journal of Islamic Social Sciences*. 16, Nr. 2, 1999.
- [4] Hans-Werner Hunziker, (2006) Im Auge des Lesers: foveale und periphere Wahrnehmung – vom Buchstabieren zur Lese Freude, Transmedia Stäubli Verlag Zürich 2006 ISBN 978-3-7266-0068-6
- [5] Handbuch der physiologischen Optik / Bd. 1. Die Dioptrik des Auges 1909, 3. Aufl. / erg. u. hrsg. in Gemeinsch. mit A. Gullstrand; J. von Kries v. W. Nagel
- [6] Hans-Werner Hunziker, (2006) Im Auge des Lesers: foveale und periphere Wahrnehmung – vom Buchstabieren zur Lese Freude, Transmedia Stäubli Verlag Zürich 2006 ISBN 978-3-7266-0068-6
- [7] Mamassian, Landy & Maloney (2002) [http://www.purveslab.net/research/A Primer on Probabilistic Approaches to Visual Perception](http://www.purveslab.net/research/A%20Primer%20on%20Probabilistic%20Approaches%20to%20Visual%20Perception)]
- [8] John R. Anderson: Kognitive Psychologie, ISBN 978-3-8274-1024-5
- [9] Biederman: Recognition-by-Components: A Theory of Human Image http://geon.usc.edu/~biederman/publications/Biederman_RBC_1987.pdf
- [10] TAYLOR, ST.: Eye Movements in Reading: Facts and Fallacies. American Educational Research Association, 2 (4), 1965, 187–202.
- [11] Yarbus, A. L. (1967). Eye movements and vision, Plenum Press, New York
- [12] Hunziker, H. W. (1970). Visuelle Informationsaufnahme und Intelligenz: Eine Untersuchung über die Augenfixationen beim Problemlösen. Schweizerische Zeitschrift für Psychologie und ihre Anwendungen, 1970, 29, Nr 1/2
- [13] Cohen, A. S. (1983). Informationsaufnahme beim Befahren von Kurven, Psychologie für die Praxis 2/83, Bulletin der Schweizerischen Stiftung für Angewandte Psychologie

Weiß

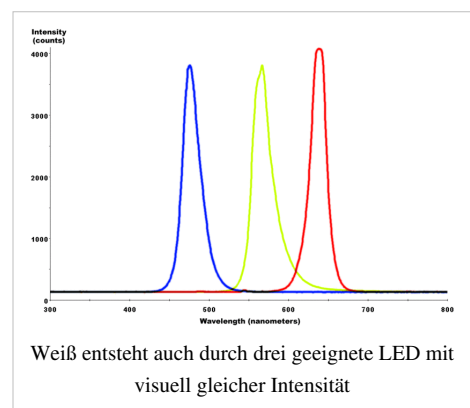
Weiß

Weiß ist, wie Schwarz und Grau, eine *unbunte* Farbe. Es ist die hellste unbunte Farbe.

Weißes Licht

Für den Menschen entsteht der Farbeindruck *weiß* immer, wenn ein Material das Licht so reflektiert (resp. remittiert), dass alle drei Zapfen in der Netzhaut des Auges in gleicher Weise und mit ausreichend hoher Intensität gereizt werden. Entsprechendes gilt für die Lichtfarbe von Selbststrahlern. Der Farbreiz für das Wahrnehmen von Weiß besteht also darin, dass alle drei Farbvalenzen gleich sind. Entsprechend der Natur der Lichtwahrnehmung kann dies auf verschiedenen (geeigneten) Spektren beruhen, wegen der notwendigen Gleichheit der Farbvalenzen bezeichnet man diese Farbe auch als unbunt.

In der Natur, speziell bei der Sonnenstrahlung, liegen auf Grund der Entstehung der Strahlung Überlagerungen von Wellenlängen vor (Planckscher Strahler). Die Sichtbarkeit von Licht wird durch die Empfindung des Auges von Mensch oder Tier bestimmt. Benachbarte Teile des elektromagnetischen Spektrums sind Infrarot und Ultraviolett, die aber nicht mehr mit den visuellen Sensoren in Interaktion treten. Der individuelle Eindruck für Weiß ist in einer bestimmten Breite der Strahlungsintensität gegeben, sinkt die Intensität der (dennoch gleichmäßigen) Farbvalenz, so entsteht der Eindruck Neutralgrau, der ebenfalls unbunt ist und entsprechend der Definition eine größere Breite^[1] an „Absolutheit“ umfasst.



Wenn solch weißes Licht gebrochen wird, werden die Wellenlängen aufgrund der Dispersion unterschiedlich stark abgelenkt und in das bekannte Bild des kontinuierlichen Spektrums zerlegt. Für den Menschen werden so die Spektralfarben violett, blau, türkis, grün, gelb, orange und rot sichtbar. Andere Anteile wie das Ultraviolett und Infrarot, die im „weißen“ Sonnenlicht ebenfalls enthalten sind, werden nicht wahrgenommen, da unsere Rezeptoren dafür nicht empfindlich sind oder die Wellenlängen zum Schutz bereits von der Hornhaut abgefangen werden.

Farbenlehre

Bei Fernsehgeräten und Computermonitoren entsteht die Farbe ›Weiß‹ durch eine additive Mischung gleicher Intensitäten der Farben Rot, Grün und Blau. Demgemäß hat ›Weiß‹ im RGB-Farbraum den Wert $RGB = (255, 255, 255)$ bei 8-bit-dezimal-Darstellung oder $RGB = (FF\ FF\ FF)$ bei hexadezimaler Darstellung.

Für den Monitor gilt entsprechend $RGB = (I_{\max}, I_{\max}, I_{\max})$ wenn I_{\max} die volle Intensität des Elektronenstrahles im Gerät bezeichnet.

Im Lab-Farbraum gilt für Weiß entsprechend: $\{L^*, a^*, b^*\} = \{100, 0, 0\}$, wobei allerdings etwa ein Papier oder weiße Textilien auch schon bei $L^* > 80$ als Weiß akzeptiert werden. Die Besonderheit des Weißen führte zur Definition verschiedener Maße, die als Weißgrad eingeführt sind. Weicht der Farbton von $a^* = b^* = 0$ ab, entsteht ein Farbstich, der bei einigen Weißgradformeln im Maß beachtet wird.

Die Symbolik der Farbe Weiß

- Weiß wird im westlichen Kulturkreis in der Regel mit Begriffen wie *Freude* assoziiert. Entsprechend steht es auch für
 - Hochzeit, Unschuld, Jungfräulichkeit
 - Unsterblichkeit – Unendlichkeit
 - Reinheit - Medizin
- Im deutschen Sprachraum ist Weiß in der sorbischen Überlieferung die Farbe der *Trauer*.
- In China dagegen wird die Farbe Symbol für Alter, Herbst, Westen und Hinterlist (vergleiche hierfür Fünf-Elemente-Lehre), in gebrochenem, cremefarbigem Ton für *Trauer* gedeutet.
- Im Judentum und als liturgische Farbe im Christentum bedeutet die Farbe *Heiligkeit*
- In der Politik: Konterrevolution, Antikommunismus
- Eine weiße Flagge bedeutet: Sofortiger Stopp der Schlacht, Kapitulation, Waffenstillstand oder Frieden.^[2]
- Neutral
- Stille
- Leere

Heraldik

In der Heraldik kann bei Wappenmalereien die Tinktur Silber, das als *Metall* bezeichnet wird, durch „Weiß“ ersetzt werden.

Kampfkunst

In vielen Kampfkünsten – wie Jiu Jitsu, Judo und Karate – wird ein Gürtel (jap. Obi) als Teil der Kampfsportkleidung (jap. Keikogi) getragen. Der weiße Gurt ist der niedrigste Schülergrad (jap. Kyū-Grad), den jeder Anfänger direkt bekommt. Die weiße Farbe repräsentiert den „reinen und unbefleckten“ Kenntnisstand des Budōka.



Der klassische Ursprung für die weiße Farbe der Anzüge (und somit auch der Gürtel) ist jedoch in der Samurai-Tradition begründet. Weiß steht in Japan auch für Männlichkeit und Tod, weshalb diese Farbe oft von Samurai unter ihrer Rüstung getragen wurde, um ihre Bereitschaft, bis zum Äußersten zu gehen, darzustellen.

Einzelnachweise

[1] Neutralgrau: Alles, was dunkler als Weiß - und heller als Schwarz ist.

[2] wdr.de: Darum weht eine weiße Fahne (http://www.wdr.de/themen/forschung/1/kleine_anfrage/antworten/antwort_weiße_fahne.jhtml)



Die in diesem Artikel verwendeten Farben werden auf jedem Monitor anders dargestellt und sind nicht farbverbindlich. Eine Möglichkeit, die Darstellung mit rein visuellen Mitteln näherungsweise zu kalibrieren, bietet das **nebenstehende Testbild**: Tritt auf einer oder mehreren der drei grauen Flächen ein Buchstabe (R für Rot, G für Grün oder B für Blau) stark hervor, sollte die Gammakorrektur des korrespondierenden Monitor-Farbkanals korrigiert werden. Das Bild ist auf einen Gammawert von 2,2 eingestellt – den gebräuchlichen Wert für IBM-kompatible PCs. Apple-Macintosh-Rechner

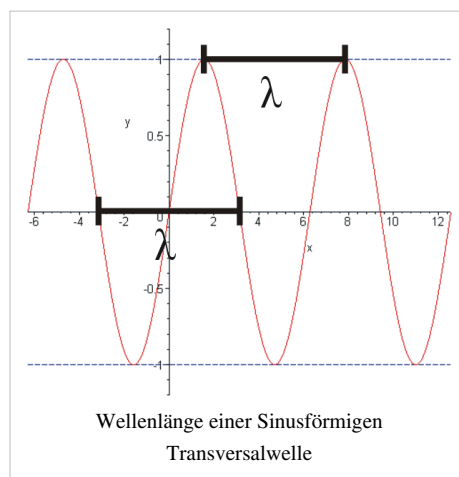
hingegen verwenden bis einschließlich System 10.5 (Leopard) standardmäßig einen Gammawert von 1,8, seit Snow Leopard kommt Gamma 2,2 zum Einsatz.

Wellenlänge

Physikalische Größe		
Name	Wellenlänge	
Größenart	Länge	
Formelzeichen der Größe	λ	
Größen- und Einheiten-system	Einheit	Dimension
SI	Meter (m)	L
Siehe auch: Periodendauer		

Als **Wellenlänge**, Symbol λ (griechisch: Lambda), wird der kleinste Abstand zweier Punkte gleicher Phase einer Welle bezeichnet. Dabei haben zwei Punkte die gleiche Phase, wenn sie sich in gleicher Weise begegnen, d. h. wenn sie im zeitlichen Ablauf die gleiche Auslenkung (Amplitude) und die gleiche Bewegungsrichtung haben. Bei Wasserwellen entspricht die Wellenlänge zum Beispiel dem Abstand zweier benachbarter Wellenberge oder Wellentäler und wird hier abweichend mit dem Symbol L bezeichnet. Sie ist das räumliche Analogon zur Periodendauer.

Es gilt



$$\lambda = \frac{c}{f}$$

wobei c die Ausbreitungsgeschwindigkeit oder die Phasengeschwindigkeit und f die Frequenz der Welle ist. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit hat also wesentliche Bedeutung beim Zusammenhang von Wellenlänge und Frequenz.

Typische Größen

- λ = Wellenlänge z. B. einer elektromagnetischen Welle oder einer Schallwelle
- Phasengeschwindigkeit $c = \frac{c_0}{n}$

mit

c_0 = Geschwindigkeit von Licht im Vakuum (Lichtgeschwindigkeit) = 299 792 458 m/s \approx 300 000 km/s = $3 \cdot 10^8$ m/s beziehungsweise c_0 = Geschwindigkeit von Schall in Luft (Schallgeschwindigkeit) = 343 m/s bei 20 °C

n = Faktor der Phasengeschwindigkeit (z. B.: Brechzahl)

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektrischen Signalen entlang isolierter metallischer Zweidrahtleiter (Kabel) ist typischerweise ungefähr 30 % geringer als die Lichtgeschwindigkeit im freien Raum (siehe Verkürzungsfaktor). Der Energietransport findet im wesentlichen im Isolator statt. Die Lichtgeschwindigkeit im Isolator ist geringer als in Luft, da eine Wechselwirkung der Welle mit der Materie stattfindet. Die Fließgeschwindigkeit der Elektronen ist wesentlich geringer als die Ausbreitung der Energie.

Bezeichnung	Symbol	Beziehungen
Amplitude	A_0	$A_0 \perp \mathbf{k}$ Transversalwelle $A_0 \parallel \mathbf{k}$ Longitudinalwelle
Wellenvektor	\vec{k}	Ausbreitungsrichtung
Wellenzahl	\mathbf{k}	$k = \vec{k} $
Wellenlänge	λ	$\lambda = 2\pi/k$
(Kreis-)frequenz	ω	$\omega(\mathbf{k})$ Dispersionsrelation
Frequenz	f oder ν	$f = \nu = \omega/2\pi$
Phasengeschwindigkeit	c	$c = \omega/k = \lambda f = \lambda \nu$
Gruppengeschwindigkeit	v_G	$v_G = d\omega/dk$
Phase	φ	$\varphi = \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t$

Wellenlängen sichtbaren Lichts: Farben

Das menschliche Auge ist in einem Wellenlängenbereich von etwa 800 nm (rot) bis 400 nm (violett) empfindlich. Bienen sehen zum Beispiel auch kurzwelligere Strahlung (Ultraviolett), können dafür aber kein rotes Licht wahrnehmen.

Weitere Informationen zum Farbempfinden des Auges finden sich im Artikel Farbe.

Wellenlänge elektromagnetischer Wellen im Medium

Für die Wellenlänge in einem Medium gilt:

$$\lambda' = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} = \frac{c_0}{f} \frac{1}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

Wenn Lichtwellen oder andere elektromagnetische Wellen ein Medium durchqueren, dessen Brechzahl n von 1 verschieden ist, so reduziert sich ihre Wellenlänge entsprechend der Brechzahl. Die Frequenz jedoch bleibt unverändert. Die Brechzahl ist dabei nicht nur für verschiedene Medien unterschiedlich, sondern hängt auch von der Wellenlänge ab. Dies zeigt sich beispielsweise in Farbsäumen bei optischen Abbildungen, die durch die sogenannte Chromatische Aberration hervorgerufen werden. Siehe hierzu auch Dispersion

Die Wellenlänge im Medium λ' beträgt $\lambda' = \frac{\lambda_0}{n}$ wobei λ_0 die Vakuumwellenlänge der Welle ist.

Wellenlängen elektromagnetischer Strahlung werden üblicherweise als Vakuumwellenlänge angegeben, ohne dass das explizit ausgedrückt wird.

De-Broglie-Wellenlänge

Louis-Victor de Broglie entdeckte, dass alle Teilchen durch Materiewellen beschrieben werden können. Die Wellenlänge einer solchen Materiewelle wird **De-Broglie-Wellenlänge** genannt und hängt vom Impuls p des Teilchens ab. Für ein relativistisches Teilchen kann die Wellenlänge mit folgender Gleichung bestimmt werden:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Dabei ist h das Plancksche Wirkungsquantum, c die Lichtgeschwindigkeit, m die Masse und v die Geschwindigkeit des Teilchens.

Weblinks

- Berechnung von Wellenlänge, Frequenz bei Schallgeschwindigkeit oder Lichtgeschwindigkeit ^[4]
- Berechnung der Wellenlänge einer Schallwelle in Luft bei gegebener Frequenz und Temperatur ^[1]
- Tabelle der Wellen mit zugehöriger Wellenlänge, Energie und Frequenz ^[2]
- Darstellung des sichtbaren elektromagnetischen Spektrums mit Angabe der Wellenlängen ^[13]

Referenzen

[1] <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-wellen.htm>

[2] http://astro.goblack.de/Theorie/t_wellen.htm

Quelle(n) und Bearbeiter des/der Artikel(s)

Absorption (Physik) *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83997942> *Bearbeiter:* Ademant, Agak, Ahellwig, Aka, Akustik, Aleks-ger, AlphaCentauri, Anhi, ArtMechanic, Ben-Oni, Ben-Zin, Berthold Werner, Bgks, Biedimpfl, BoP, Boehm, Cepheiden, Chemiewikibm, Church of emacs, Ckeen, Crux, DFK, Der ohne Benutzername, Der-Rob, Diba, Don Magnifico, ElRaki, Engie, Forbfruit, Geotutor, Gnu1742, HPaul, Head, Hei ber, Heinz-Josef Lücking, Herbertweidner, Hhoffmann, Howwi, Hystrix, Jondor, Jostar, Kku, LC, Leider, Leon, Leyo, Linksfluss, M.ottenbruch, Mönsterxxl, MR MC, Magnus, Malteser.de, Matt1971, Media lib, Mendax, Mevsofw, Mikue, Nachtagent, Nephelin, Nerd, Nicolas G., Nimix13, Omi's Törtchen, Osmium, Paddy, Pelz, Peter200, Pittmann, Pohli, Roerl, Roland.chem, Sch, Schnargel, Staro1, Tango8, Toffel, T Strauss, Ulfbastel, UvM, Wheedhee, William Wallace, Wolfgang1018, YourEyesOnly, 80 anonyme Bearbeitungen

Additive Farbmischung *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84139228> *Bearbeiter:* Adrian Lange, Aka, Alraunenstern, Analemma, Andys, Asb, Asthma, Bautsch, Ben der Honk, BerndGehrmann, Boonekamp, Cami de Son Duc, Carbenium, Centic, D42, DiplomBastler, Duesentrieb, Eckhart Wörner, Engie, Flominator, Frank Klemm, Friedrich Graf, Gardini, Geos, Hardcoraveman, HarryDo, He3nry, Jaques, Jodoform, JuTa, Kats-rule, Kh80, Koala, Little jo, MFM, Martin0reg, Muck31, Nephelin, Nikater, Oliver Runge, PDD, Peter200, Philipendula, Pik-Asso, Quistnix, Regi51, RobertLechner, Saethw, Semper, Shoshone, SigmaB, Sinn, Soeogo, Spuk968, Srvban, Stefan Kühn, Superplus, Sy135, TMg, TRoX, TiHa, Uwe Gille, W!B:, Wolf32at, Wst, YourEyesOnly, 84 anonyme Bearbeitungen

Auge *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84210136> *Bearbeiter:* 112.234.186.195.dial.bluewin.ch, 24-online, 2ndjuge, 3268zauber, 4tilden, 790, 9mal Kluger, A.Savin, Achim Raschka, Adornix, Aglarech, Aineias, Aka, Alcibiades, AlexEsser, Alexander.stohr, Alfst, Amogokon, Andre Engels, AndreasE, Androl, Ann G. Neem, Aquis, Arcturus, Arilou, Asdfj, Ayacop, B77-6, BLueFiSH.as, Baerchen4711, Baumfreund-FFM, Baumst, Bdk, Ben-Zin, Big-N, Binter, Bitteloessen, Blaubahn, BoP, Boonekamp, Boronian, Bubinator, Buteo, C.Löser, Carsten-duerselen, CdaMvVwG.s, Ce2, Chaddy, Chirlu, Chris S., ChrisHamburg, Christian2003, ChristianBier, Christoph Völker, ChristophDemmer, Claudioverfuert, Clemensfranz, Concept1, Conny, Conversion script, Crash73, CrazyD, Cyclosa, Cymothoa exigua, Cú Faoil, D, DaB., Dachris, Daniel 1992, Dbenzhuser, Deniz, Density, Der Chronist, DerHexer, Doccycod, Don Maestro, Duesentrieb, Dusty Roy, El estreñeñu, ElRaki, Elborn, EricPoehlsen, Felix Stember, Felix.Schwarz, Ffff, Fgb, Fice, FischX, Fladi, Flo 1, Flo12, Flothi, Frank Klemm, Frank Schulenburg, FritzG, Fullhouse, GNosis, Gabl, Gako, Gancho, Gauss, Geilo, Georg Messner, GeorgHH, Gleiberg, Gnu1742, Gum'Mib'Aer, Gäster, H. de Groot, HAL Neuntausend, HaSee, Hadhuey, HaeB, Hagbard, Hans Koberger, Hardenacke, He3nry, Head, HenrikHolke, Homer9913, Honge, Hytrion, Ikbal21, Inkowik, Itu, J.-J-Rousseau, JHeuser, Jahn Henne, Jailbird, JakobVoss, James hetfield, Jan R, Jed, Jergen, Jesta, Jivee Blau, Jobu0101, Johnny Controletti, Jpkoster1, Juesch, JvE, KJM, Kabanos, Kabejota, Kam Solusar, Karl-Henner, Kasiwai, Katharina, Kavaayan, Kersti Nebelsiek, Kh80, Kibbel, Kliv, Kopoltra, Krawi, Kubi, LX, LadyLilly, Lax, Lektor, Liberal Freemason, Louis Bafrance, M. Kühn, M.L, Marc Gabriel Schmid, Mardil, MarianSigler, Marilyn.hanson, Matt1971, Matzematik, Maveric149, Media lib, Meikel1965, Melancholie, Merlin G., Metagutier, Mgehrmann, MichaelFrey, Mikue, Mkuffner, Momomu, Mps, Necrophorus, Nephelin, Nerd, NiTeChiLLeR, Nicor, Nightwish62, Nocturne, Nutzer142, Ochro, Odin, OecherAlemanne, Old toby, Onno, Otets, Otto Normalverbraucher, Oxyoron83, Paddy, Paramexium, Paunaro, Pav190, Perrak, Peter200, Philipendula, Philipp Saueremann, Pianomo, Pietz, Pill, Pomona, Poupée de chaussette, Pro2, Proofreader, Quant3-kurztrumpf, Qwqchris, Ralf Roletschek, Ranunculus, Rdb, Redf0x, Redlinux, Regi51, Renato Caniatti, Riptor, Rmw, Rnordsieck, RoB, Robodoc, Romanm, Ronaldo, Rubik-wuerfel, Sansculotte, Sargoth, Scav77, Schandolf, Schlawiwestrumpf, Schlurcher, Schmidtdichs, SebastianWilken, Seewolf, SiriusB, Smukow, Snoop, Spuk968, Stefan Kühn, Stefan h, Steinninn, Stephan212, Stern, Sternenstauner, Streicher466, Stuby, Suhadi Sadono, Supersteffen, Suricata, Susanne Garchner, Synapse, Taadma, Talos, Tarantelle, Template namespace initialisation script, Terabyte, Thetawave, ThiloSchulz, Thomas S., Thomas7, Thorbojern, Thorard, Tkarcher, Tlustulimu, To old, Tobo, Torsten Henschel, Transportme, Tric, Triebblätter, Triple5, Tsr, Typischmehl, Ulm, Umweltschützen, UncleOwen, Uwe Gille, Valnar, Vel, Visi-on, WAH, Weede, White roten rabbit, Wickedbitweasel, WikiNick, Wilhans, Wipape, Wolfgang1018, Wst, Wyna, Zaibatsu, Zaphiro, Zaungast, Zinnmann, Zollernalb, Zophod, ³²P, ⁸, 252 anonyme Bearbeitungen

Bildschirm *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84046117> *Bearbeiter:* A.Savin, Abc2005, Achim Raschka, Ahellwig, Aka, AlexTornado, Alkibiades, Allesmüller, Alnilam, Andy1982, Armin P., Asb, Avoided, Avron, Balû, Bautsch, Bildungsbürger, Bitbert, Blunt., Bugert, Bücherwürmlin, Chaddy, Chris486, ChristophDemmer, Complex, Crux, D, Darkone, DasBee, Diba, Dundak, Edguy, El., ErnstA, Euphoriceyes, Fallenleaf, Fjmi, Friedemann Lindenthal, Gail, Ger1axg, Guillermo, Hannes Kuhnert, Hardenacke, HaukeZuehl, He3nry, HenrikHolke, Hermanthomas, Herriek, Hgulf, Howwi, Hubertl, Hydro, Igo, Incobs, JARU, Jodoform, JuTa, Juhuul, Kai1337, Karl-Henner, Kku, Koethnig, Kolja21, Konzales, Kopoltra, Kungfuman, LKD, Lantash, Leider, Leipnizkeks, Libelle63, Magnummandel, MalteAhrens, Markus Pfeil, Marti7D3, Martin-vogel, Martin1978, Matt1971, Matzeschmitz, Meisterkoch, MichaelDiederich, MichiGreat, Mikue, Mmg, Mmmkay, MrBurns, Nicolas17, NineBerry, Nirakka, Numbo3, Nummer9, OecherAlemanne, Omniavincit, Onee, Ot, Ottomanisch, Parzi, Peter200, PeterFrankfurt, Philipendula, Pill, Pittmann, Primus von Quack, Pytho, Ratopi, Richie, Roland Berger, Ronny Michel, Rr2000, Rufus46, Sansculotte, Schnargel, Schusch, Secular mind, Septembermorgen, Shadak, Shui-Ta, Sommerkom, Staro1, Stefan Horn, Stefan h, Stern, StromBer, Taxiarchos228, Terabyte, Thgoiter, Thomas, Thorbojern, Tinz, Tomtomorrow, Trustable, Ucc, Ulfbastel, VWDude, Vierge Marie, W!B:, Wiegels, Wolf32at, Wst, Xarax, XenonR, YMS, YourEyesOnly, ZodiacXP, 211 anonyme Bearbeitungen

Blau *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84245531> *Bearbeiter:* 80686, Admin13, Aineias, Aka, Alkab, Andre Engels, Andreas S., AndreasE, Asthma, Avoided, Bakufu44, Balû, Bangin, Beek100, Berlin-Jurist, B3rner Schildkröte, Bnningench1, Björn Bornhöft, BoP, Boonekamp, Boris R., Brackenheim, Calined, Cheiron94, Ckeen, Cornischong, D, Dalisay, Daniel, Daniel FR, DanielMrakic, DasBee, Denkfehler, Der.Traumer, DerHexer, Diba, Diebu, Diefarbelblau, Dietzel, DiplomBastler, Dogbert66, Drahreg01, Dreadn, Drillinge3, Emeritus, Enomine, Ephraim33, Euka, Euku, Faltenwolf, Feba, Fg68at, FordPrefect42, Frau Braun, Gerbil, Gilliamjif, Grey Geeker, HAL Neuntausend, Hagman, Halbarath, Hens J, Castorp, Hardenacke, Head, Henrike Laehnemann, Hgrobe, Hofres, Hoosic06, Howwi, Hubi, Immanuel Gel, In dubio pro dubio, Inkoewik, Ixitixel, JPense, Janine21, Jed, Jorele, JuergenL, Kai11, Karl Gruber, Karl-Henner, Kats-rule, Kausel, Kh555, Kh80, Klötenschlumpf, Kmf, Koala, Krawi, Kuebi, Kurt Jansson, Kürschner, LKD, Leipnizkeks, Lirum Larum, Ludger1961, Magnummandel, Mailtosap, Markus Mueller, MarkusZi, Martin-vogel, Martinl, Marti314, Mbdortmund, Meleagros, Michael Jansen, MichiK, Miglincit, Mjk, Moguntiner, N23.4, Nerd, Nightshiver, Nilstissen, Ninjamask, Oimel, Olaf's Wissen, Otfried Lieberknecht, Otto Janko, Oxyoron83, Parakletes, Pendulin, Penny200, PhJ, PhR411, Pill, Piteo, Pitichinaccio, Pittmann, Pjacobbi, Pooweasel, Pyrenaien, Ralf Roletschek, Ralf1985, Rauenstein, Regi51, Reinhard Kraasch, ReqEngineer, Ri st, Ribo, RokerHRO, Roo72, Rote Bete, Rusch25, SPS, Sascha Huth, SchallundRauch, Schlesinger, Schniggendiller, Schwijker, Semper, Sergio Delinquente, Shadak, Sig11, Sinn, Small Axe, Spawn Avatar, Spuk968, St.s, Stefan h, Stephanbim, TiHa, Tilla, Toast-ghost, Tommy Kellas, Trannyl, Tromboman, Tsr, Tönjes, Umweltschützen, Uwe Gille, Vasil, W!B:, WAH, Walter Falter, Whaite, White gecko, Wiegels, Wikipeditor, Wissens-helfer, Wolfandreas, WortUmBruch, Wst, YourEyesOnly, Zaibatsu, Zollernalb, Überraschungsbilder, 200 anonyme Bearbeitungen

Brechung (Physik) *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84047120> *Bearbeiter:* Adrian Lange, Aka, Alchemist-hp, Alexander.stohr, Anton, ArtMechanic, Avoided, Baumfreund-FFM, Baumi, Ben-Zin, Boehm, Boemmels, Btr, Bugoku, Carol.Christiansen, Cdag, Cepheiden, Chirpy, ChrisHamburg, ChristophDemmer, Church of emacs, Ckeen, Cmoder, DaB., DerHexer, Dittmar-Ilgen, Don Magnifico, EXitus, El, ElRaki, Elya, Enn, Entlinkt, Erik Streb, Exkalibrator, FritzG, FutureCrash, Gdarin, Geof, Georg-Johann, Gnu1742, HaeB, Hardenacke, He3nry, Heitron, Henning Ihmels, Herbertweidner, Ironix, Iwoelbern, Jackalope, Jivee Blau, KaiMartin, Kako, Karl-Henner, Keko, Krawi, Krtschil, Kuhlo, Königsgambit, LKD, Marc Tobias Wenzel, Martin Bahmann, Megatherium, Mnh, Nephelin, Norro, Numbo3, Nyse, Olei, Onee, Ot, P. Birken, Paddy, Pelz, Peter200, Pfalzfrank, Phil41, Philipendula, Pill, Pittmann, Proxima, QualiStattQuanti, Querverplänkler, RJensch, Rainald62, Rasko, Rdb, Romanm, Roo1812, SISI, Schaengel89, Schewek, Schulzjo, Seewolf, Siehe-auch-Löschter, Sinn, Smial, Sockenpuppe 23 from outer space, Sommerkom, Southpark, Splayn, Spuk968, Stefan-Xp, SuperFLoh, Tetti, TheK, Tilla, Trinitrix, Tsr, Ulz, Umweltschützen, UvM, W!B:, Wanni20, Wickie37, Wiki-observer, Wolf32at, Wolfgang1018, Wolfgangbeyer, XenonX3, YourEyesOnly, 192 anonyme Bearbeitungen

Brechungsindex *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83942067> *Bearbeiter:* A2h0wat, Adornix, Afluegel, Aglarech, Amtiss, Anathema, Andre Engels, Andyg, Anhi, ArtMechanic, Bananeweizen, Belgariath, Boehm, Boemmels, Bärski, CalRis25, Cepheiden, ChristophDemmer, Claude J, Cäsium137, DasBee, Dietzel65, Dnalor, Doudo, Dr. Angelika Rosenberger, Dr.cueppers, Duesentrieb, EdytaT, Ernsts, Eulenspiegel1, F.Burgwedel, Fabian R, Fgb, Flurax, Formatierungshilfe, Franzl aus tirol, G, Gary Luck, Geof, Gulp, Hansele, Helium4, Herbertweidner, Hgulf, Hiukkas, Howwi, Iridos, JWBE, JenniferHailey, Jivee Blau, JogyB, Juiso, Juliabackhausen, Kai11, KaiMartin, Karl Bednarik, Kdkeller, Kein Einstein, Knoerz, Krtschil, Kursch, Lantus, Laza, Leyo, Logograph, Lukz, Mönsterxxl, Mabschaaf, Masc88, Maximus Rex, Megatherium, Membeth, Mendli, Mikue, Mipago, Monsterxxl, NEUROtiker, Neomabre, Numbo3, Nyse, OlPr, Orci, Oreg, Patrick Rose, Peter231, PeterFrankfurt, Pewa, Philister, Pittmann, Proxima, Quno, Ra'ike, Rainald62, ReinerSpass, Rjh, Rob Irgendwer, RokerHRO, Roland1952, Rubblesby, Sachrimmir, Scorpion2211, Searinox, Spuk968, Srvbauer, Stadtmaus0815, Stefan Kühn, Stefan Resch, Stomp, T.hellwig, Talaris, TdL, Texec, Tilla, Traitor, Trinitrix, Tönjes, Ulm, Umherirrender, Urizen, Uwe Gille, VeronikaM, Vikipedija, Wiegels, WikiJourney, Wollschaf, Wurzel, Xquenda, Zollernalb, 127 anonyme Bearbeitungen

CIE-Normvalenzsystem *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83760800> *Bearbeiter:* A1000, Abdull, Aka, Al'be:do, Aloiswuest, Avron, Barbulo, BesondereUmstaende, Bildungsbürger, Boonekamp, Bücherwürmlin, Delete, DiplomBastler, Don.haraldo, Friedolin, Gambetti, HaTe, Head, Igrimm12, JuTa, Kapege.de, Katzenstreu, Krokofant, Loh, Phrood, Realbackwinged, Rotkaeppchen68, S.K., Schnargel, Siehe-auch-Löschter, Smial, Stummli, The Bestsellor, TiHa, Tim.landscheidt, Tom md, Tromboman, Trooper, Video2005, W!B:, WikiJourney, Wikimurmeltier, WolfgangPue, Wsfm, Xjs, , 58 anonyme Bearbeitungen

CMYK-Farbmodell *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83923513> *Bearbeiter:* Ahellwig, Aka, Androsch, Aphex3K, Arnulf zu Linden, Bahnmoeller, Boonekamp, BorisHB, Bur, Ce2, Ckeen, Die zuckerschnute, DiplomBastler, Duesentrieb, Emeritus, Erika39, Euphoriceyes, Exil, Flothi, Fristu, GDK, Grixlkraxl, Hagbard, Hhdw, Hhdw1, Hjsalchow, Horst Frank, Hurd, Jailbird, Jpp, Jumbo1435, Kh555, Kh80, Kibert, Kku, Krawi, Leckse, Martin-vogel, Martinl, MasterFaS, Metalhead64, Michael Franke, Mikue, Mir, Mo4jolo, Negerkale, Newone, Nicolas17, Nikater, Numbo3, Oceancetaceen, PerfektesChaos, Peter17, Planetenspace.de, Ralf Roletschek, Regi51, Rokwe, Schewek, Schwallax, Scooter, Selignow, Sinn, Stargamer, Stefan Kühn, Stefan h, Suhadi Sadono, Surferskieur, TMg, Thomas G. Graf, TiHa, Tilman Berger, Tokikake, Toter Alter Mann, Trancos, Tönjes, U86774, Umweltschützen, Uwe Gille, W!B:, Webkart, WikiPimpi, Wikimensch, Wizzar, WortUmBruch, Xantares, YourEyesOnly, 93 anonyme Bearbeitungen

Cyan *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=81679112> *Bearbeiter:* Aisano, Alone Coder, Andys, Asthma, BJ Axel, BMK, Badger, Baumst, Bent, Bernburgerin, BjKa, BoP, Boonekamp, Branddobbe, Calined, Daniel FR, DerSchmunzelhase, Dogbert66, Echoray, Enzo, ErikDunsing, Giftpflanze, Ireas, Karl-Henner, Kats-rule, Kausel, Koala, Libelle63, Markus Mueller, MichiK, Montauk, Mps, Neitram, Nikater, Obersachse, Olaf Kosinsky, Overdose, PeterZF, Pjacobi, Rauenstein, Regi51, Schwarzsachtel, Sig11, Spawn Avatar, Spuk968, Stefan h, Succu, The Evil IP address, TiHa, Tönjes, W!B:, WAH, Wiegels, Wolfgang1018, 42 anonyme Bearbeitungen

Dreifarbentheorie *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84154211> *Bearbeiter:* 790, Analemma, Die zuckerschnute, Dogbert66, Elwe, Hardcoreraveman, Kats-rule, Leomeyer, Lysia, MBq, Neokortex, Peter200, Phrood, PrismaNN, Proxima, Schubbay, Siehe-auch-Löscher, Stern, TRoX, Uwe Gille, W!B:, °, 9 anonyme Bearbeitungen

Elektromagnetische Welle *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83813698> *Bearbeiter:* ABF, AS, Aka, Anhi, Anony, ArtMechanic, Atompilz, Averse, B.gliwa, BKSlink, Belsazar, Ben g, Ben-Zin, BesondereUmstaende, Blauer elephant, Bob Frost, Ce, Ce2, Cepheiden, ChristophDemmer, Claude J, Connolly, Conversion script, Cost, Crux, Daaavid, Darev, DerHexer, Diba, Don Magnifico, Dr. Harald Wozniowski, Dr.cueppers, Ehemaliger Vandale, Enslin, Eugen Ettelt, EvilEye, Fairway, Fgb, Fischer.sebastian, Flups, Fristu, Fuenfundachtzig, Geitost, GeorgGerber, Gerbil, Gerd Breitenbach, Gerhardvalentin, Guillermo, HAL Neuntausend, HaSee, Halaku, Head, Herbertweidner, Hildegund, Hohue, Horst Frank, Hydro, Ing. Schröder Walter, Internetcafe, Isheden, Jan13, Jensel, Jeremiah21, Joddel, JohannWalter, JuTa, Jörg Hubertus, Kmic, KaiMartin, Kam Solusar, Katharina, Kein Einstein, KlausFueller, Kmarawer, Konrad F., Krischan111, Kurt Jansson, Lascorz, Lektor, Marcel Wiesweg, Martin-vogel, Matze6587, MauriceKA, Mbdortmund, Media lib, Metuschelach, MichaelHaeckel, Mk-stuff, Mrnett1974, Muck31, Night Ink, Numbo3, Orthograf, Paddy, Pediadeep, Pelz, Peter200, Phillemann, Phrood, Planetenbeschleuniger, Prissantenbär, Proxima, Rainald62, Raw Style, Rdb, Regi51, Reinhard Kraasch, Reseka, Rjh, Roo1812, Rupert Pupkin, S.Kiefhaber, Sabata, Saperaud, Schewek, Schlurcher, Schubbay, Schusch, Seewolf, Sinn, Spawn Avatar, Spundun, Stefan h, Stefanwege, Tobias Bergemann, Tschäfer, UvM, Wdwd, Wipape, Wolfgang H., Wolfgang Schulze, Wst, YourEyesOnly, Zahnstein, Zipferlak, Zwikki, Zwoenitzer, 173 anonyme Bearbeitungen

Elektromagnetisches Spektrum *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84193771> *Bearbeiter:* 222r45054, Aka, Androl, Anhi, Atamari, Atompilz, Ben-Oni, Biezl, BoP, Boehm, Cepheiden, ChristophDemmer, Czeko, Der Geo-Graf, DerHexer, Dp99, Dsommer, Dubu, El, Epix, Erethor, EvilEye, Fgb, Fish-guts, FriedhelmW, G. Vornbäumer, Gar Niemand, Geophysicist01, Gerd Breitenbach, Gerhardvalentin, Gluon, HaSee, HaeB, Halbarath, Hans Koberger, Hans-Peter Scholz, Hbrucker, Herbertweidner, Horst Frank, Isheden, Jailbird, Jofi, Juliabackhausen, Kam Solusar, M.L., Münsterxxl, Magnummandel, Martin-vogel, Martin1978, MauriceKA, Mianger, MichiK, MrBurns, Muscari, Mwbeer, Ncnever, Ninjamask, OecherAlemanne, Peter200, PeterFrankfurt, Phrood, Pittimann, Prissantenbär, Proxima, Redecke, Redlinux, Regi51, Rp, Saehrimmir, Semper, Sentry, Sinn, Solid State, Sommerstoffel, Spawn Avatar, Speisensender, Stefanobasta, Stefanwege, Stw, Template namespace initialisation script, UvM, Vhfuhf, Vodimivado, Wdwd, Wikifreund, Wipape, Yahp, YourEyesOnly, Zahnstein, Zibertan, Zivilverteidigung, 91 anonyme Bearbeitungen

Entstehung von Farben *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=79623946> *Bearbeiter:* APPER, Abberline, Aka, ArtMechanic, Ben-Zin, Boonekamp, Buteo, ChristophDemmer, Complex, Cost, DasBee, Don Magnifico, Emes, Euphoriceyes, Firsthuman, Guandalac, Hardcoreraveman, Helium4, Johnny Controletti, Kas23j13m4n, Kats-rule, Kibert, Kulac, Kursch, MFM, Michael Gäbler, Nephelin, NiTenIchiRyu, Paddy, Peter200, Proxima, Rosa Lux, Ruru, Sangiovese, Schusch, Seewolf, Sinn, Trinitrix, Tsui, Wdwd, Wolfgang H., 40 anonyme Bearbeitungen

Falschfarben *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=82113023> *Bearbeiter:* .Aiko, AN, AlterVista, Boehm, Boonekamp, Borisbaran, Chemiewikibm, FriedhelmW, Gohnarch, HardDisk, Hardcoreraveman, JD, Kats-rule, LC, Matt1971, Merlin G., Mueck, WikiCare, Winne, X-Weinzar, Xorx, 9 anonyme Bearbeitungen

Farbart *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=74308571> *Bearbeiter:* Boonekamp, Don Magnifico, Gamma, Hardcoreraveman, Kats-rule, Omniavincit, PerfektesChaos, Purodha, Repat, Rufus46, SibFreak, 2 anonyme Bearbeitungen

Farbe *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84137443> *Bearbeiter:* 790, A.Savin, AT-Verlag, AbdulAlhazred, Abubiju, Acky69, Aglarech, Aka, AlexR, Analemma, Andante, Andreas 06, AndreasE, Andys, Anne Ammann, Ar-ras, Area, Arnomane, ArtMechanic, Asthma, Astralkörper, Atoth, AurinKo, Avoided, Awaler, Bangin, Bautsch, Bhommel, Beek100, Berglyra, Bernburgerin, Bhuck, Bijick, Bildungsbürger, Björn Bornhöft, Blah, Blaue Orchidee, Boonekamp, Brackenheim, Bsmuc64, BurghardRichter, Caliga, Caronna, CarstenK, Ce, Ce2, Centic, Cepheiden, Chd, Cherubino, Christian.Winterstein, ChristophDemmer, Christophe Watier, ChristopheS, Christopher, Cjesch, Kkeen, ClemiMD, Complex, Conversion script, Corvina, Curtis Newton, D, DaMutz, Dachris, DasBee, Dendroaspis, DerHexer, Diba, Dickbauch, DiplomBastler, Don Magnifico, Dr. Manuel, Druffeler, Dundak, Dunkelschwarz, Eike sauer, Eikeschnuppertal, Elvaube, Elya, Engie, Entlinkt, Entropy, ErikDunsing, Erzbischof, Feba, Fedi, Filip nohe, Filzstift, Friedrich Graf, Fristu, Fusslkopp, Gardini, Geheimer, Gerbil, Gerd Breitenbach, Giant2, Gleiberg, Gnu1742, Gregor Bert, Guidod, HaSee, Harald Küppers, Hardcoreraveman, Hardenacke, HarryDo, Hattakiri, Hauarte, He3nry, Hedd, Heimli1978, Henning Blatt, Hewa, Hoffmann, Howwi, Hubertl, IZazen, Ileo, Immanuel Giel, Inkowik, Internetcafe, Invisigoth67, Iuu, JD, JPB, JPense, Janine21, Jed, Jens31, Jergen, Jhartmann, Jivee Blau, Joni2, Josef.schneider, Jschoeck, Juesch, KMJ, Kalli R, Kaneiderdaniel, Karl Gruber, Karl-Henner, Katharina, Kausel, Kibert, Kku, Knarf-bz, Koala, Koelnerbinchen, Krawi, Kristina Walter, Kursch, Kurt Jansson, LKD, LabFox, Leipnizkies1, Libelle63, Liuthalas, Logograph, Louis88, Ludgerkueper, Luegu, Lukz, Lyzzy, M.L., Magnus Manske, Maik Brauer, MajorR, Manorainjan, Marti7D3, Martin Bahmann, Martin Homuth-Rosemann, Martin-vogel, MartinWoelker, Maschelle, McB, Meister-Lampe, Miaow Miaow, Micha2564, Michael Merle, Michael Mickel, Michael der Trunkene, Mike Krüger, Mikue, Millbart, Mjk, Mnh, Mo4jolo, Mohahaddou, Mordan, Morpheus1703, Morpheus2309, Mps, Muck31, Narktor, Neokortex, Nephelin, Nicolas G., Nilreb, Nilstissen, Nixdorf, Nockel12, Numbo3, OecherAlemanne, Olaf Simons, Olaf Studt, Olei, Ot, Overclocker, ParaDox, Parsimony, PeeCee, Pelz, Perrak, Peter200, PeterZF, PhJ, Philipendula, Phrood, Pik-Asso, Pittimann, Pjacobi, Polarlys, Precilla, Proxima, PsY.cHo, Quintero, Rabanus Flavius, Rabel, Raphael Frey, Rat, Rauenstein, Regi51, Ribald, RobertLechner, Rosa Lux, Rufus46, Sabine0111, Saehrimmir, Saibo, Sangiovese, Saperaud, Schachtelsatz, Schewek, Schlag.tel, Schlesinger, Schluddi, Schmidttchen, Schnupf, Schorschski, SebastianBreier, Seewolf, Sei Shonagon, SigmaB, Sinn, Sitic, Smeyen, Smial, Soeren Gasch, Spinnerin, Spuk968, Stefan Knauf, Stefan Kühn, Stefan h, Stefan64, Steffen, StillesGrinsen, SuperFLoh, T.a.k., TMg, Teletonymymex, The Evil IP address, ThorAlexander, Thornard, Thoss, TiHa, Tiillniermann, Tiironmundam, Tobias1983, Tom Jac, Tommy Kellen, Tritonox5, TruebadiX, Trustable, Tzzzpfiff, Tönjes, U86774, UKGB, Ucc, Ulli Purwin, Ulrich.fuchs, Ute-s, Uwe Gille, Victor Eremita, W!B:, WAH, Wdwd, Wellenlänge, Werber, Wiegels, WikiNick, Wikipeditor, Wingert, Wissenschaftsredaktion, Wolf32at, Wolfgang H., Wolfgangbeyer, Wollmersdorfer, Wst, YourEyesOnly, Zaungast, Zerohund, ZweiBein, €pa, 500 anonyme Bearbeitungen

Farbenblindheit *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83695395> *Bearbeiter:* 24-online, Aka, Aka999, Alkab, Arno Matthias, Björn Bornhöft, Blaubahn, BlaueKatze, Boonekamp, Brackenheim, Bur, Bücherhexe, Christian2003, Cleante, Der.Traeumer, DerHexer, Dinah, Dr. Hagemann, Draheg01, Eingangskontrolle, Engie, Eorhim, Floren Fortescue, Gandalf Mithrandir, GeorgR (de), HAL Neuntausend, HenrikHolke, Howwi, Joghurt42, Joli Tambour, Joni2, K.obermann, KaiMartin, Kalorie, Kersti Nebelsiek, Koerpertraining, Konunautupeia, Kuebi, Kuhlho, LKD, Lecartia, Linda.md, MBq, Marilyn.hanson, Michael Mauch, MichaelDiederich, Mikue, Origamiemensch, Overdose, ParaDox, Pendulin, Polarlys, Pubert, Querverplänkler, Regi51, Roland Kaufmann, Roterraecher, Rotkaeppchen68, Rynacher, Saethwr, Schewek, Sinn, Snevern, Southpark, Stefan64, W!B:, WagnerAndreas, WalDir, Wiwi268, XenonX3, YourEyesOnly, 111 anonyme Bearbeitungen

Farbenlehre *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=82022560> *Bearbeiter:* Odysseus, A.Savin, A1bi, AFI, Aka, Al'be:do, Albinacum, Andante, Andys, Anima, Asb, Asthma, Blah, Blaubahn, BluePuddle, Bohr, Boonekamp, CaSe, Carbenium, Caustic, Chatter, Cherubino, Chimin 07, ChristophDemmer, Chrlk, Kkeen, DasBee, Deeleres, DerHexer, Draheg01, Duesentrieb, Dymachus, Ephraim33, Euphoriceyes, Fristu, Gregor Bert, H.Albatros, Harald Küppers, Hermannthomas, Highpriority, Hungchaka, Ikarus1969, Inkowik, Jodo, JohOnneken, Kai-Hendrik, Krawi, Lauf42, Luestling, MAK, Martin Wilmers, McSush, Olei, Oncee, Peter200, Pik-Asso, Pjacobi, Qniemic, Rdb, Regi51, Robertsan, Roo1812, SchallundRauch, Sei Shonagon, Sesc, Sewa, Sinn, Small Axe, Staro1, The Real Sancho Pansa, Thomasione, TiHa, Tilla, Tom Jac, Trublu, Tönjes, Ulli Purwin, Uoeia, Uwe Gille, W!B:, Wst, YourEyesOnly, Zoelomat, 111 anonyme Bearbeitungen

Farbfernsehen *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84017012> *Bearbeiter:* ANKAWÜ, Achates, Aka, Anorak, Armin P., Aths, Avron, Brazzy, Cartinal, Complex, Concrete and Steel, Dansker, Der Schober, Der.Traeumer, DerHexer, Deralex, Dr. Colossus, Echtner, El., Elchbauer, Erik.meiss, ErikDunsing, Erwin Lindemann, Euphoriceyes, Florian Adler, Fontipex, GeorgGerber, Guffi, HaSee, HaeB, Hhc, Invisigoth67, Isis2000, Jeanyfan, Johnny Controletti, Kleinesgelbesdreieck, Koethnig, Krawi, Liberatus, Linnet, Lotse, Manecke, Media lib, Mk4711, Momomu, Muck31, Normalo, Onkel Dittmeyer, Ot, Pelz, Peter Littmann, Philipp Wetzlar, Pickguard, Pilawa, Pittimann, Plumpaquatsch, Qwqchris, RaconyRE, Regi51, Remirus, Riffriif, Rubblesby, Schwijker, Septembermorgen, Shiut, Sinn, Sloyment, STG1990, Staro1, Superplus, T H, T.a.k., TableSitter, Tooststrong, Trublu, Tschäfer, Tsui, Tönjes, WAH, Wikifreund, Wittkowsky, Yagosaga, YourEyesOnly, Zac67, Zaphiro, 81 anonyme Bearbeitungen

Farbfilm *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=80389024> *Bearbeiter:* Akroti, Arpitam, Asb, Bildungsbürger, Cybershot800i, Dozor, Ebcdic, Fabian6129, Greenhorn, Hans Werder, Hutschi, Ixitixel, Joggi, Jpgoelz, Kapege.de, Kubrick, Laudrin, Metoc, Mikue, Nb, Neutral1907, Ole62, Otto Normalverbraucher, Paulae, Rotkaeppchen68, Siehe-auch-Löscher, Spuk968, Staro1, Stillfehler, Tim.landscheidt, Tlatosmd, V.R.S., Xquenda, €pa, 29 anonyme Bearbeitungen

Farbkreis *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=82544479> *Bearbeiter:* 23.144186.42, Aka, Alfred Nobel, Anonyma, Apokalyptischer Reiter, Apostille, Baumfreund-FFM, Bender235, Boonekamp, Brackenheim, Chaddy, Chrisfrenzel, Kkeen, Codeispoetry, Curtis Newton, David Franz, Deeleres, Dein Freund der Baum, Dietrich, DiplomBastler, Fecchi, Fixlink, Flow2, Geist, der stets verneint, Gnu1742, HaSee, Hardcoreraveman, HarryDo, Hedwig in Washington, Irmgard, Jan G, Jdeuchert, Jkbw, Kats-rule, Kausel, Konsumopfer, Konwiki, Louis Bafrance, Lyzzy, MarkusNi, Martinl, Mastdani, McSush, Mfb, Mhier, Mnh, Nadd, Nocturne, Ottomanisch, Pascal Auricht, Pc, Pelz, Peter200, Philipendula, Pietz, Pilawa, Pittimann, Ri st, Rissa, Rufus46, SchallundRauch, Schnulli00, Schubbay, Schwarzseher, Sloyment, Soeren Gasch, THOMAS, The Real Sancho Pansa, Thorbjørn, TiHa, W!B:, WAH, YourEyesOnly, 117 anonyme Bearbeitungen

Farbmetrik *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=80286465> *Bearbeiter:* Andrika, Avoided, Boonekamp, Deorma, Dogbert66, Feierfrosch, Hardcoreraveman, Kats-rule, MartinWoelker, Millbart, Mushushu, RoB, Sicherlich, Smial, Southpark, Staro1, Succu, The Real Sancho Pansa, Tniemueller, Ulfbastel, Uwe Gille, W!B:, Wissenschaftsredaktion, Xorx, 11 anonyme Bearbeitungen

Farbmittel *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83494760> *Bearbeiter:* APPER, Aka, Andreas S., Atamari, Bbswl, Boonekamp, Bundesstefan, Carniit, Cherubino, Cjesch, Dagdor, DieAlraune, DiplomBastler, Docleeter, Dogbert66, Don Magnifico, Dr. Meierhofer, Elwe, ErikDunsing, Hadhuey, Hardcoreraveman, HarryDo, Ivko, JayLow, JosefLehmkuhl, Kats-rule, Kausel, Kibert, Kku, Lectum, Lottemann, Mnh, Musik-chris, Olaf Studt, Onee, Parrho, Peterlusting, Pittimann, Pjacobi, Rjh, RokerHRO, Rolf Schulte, Seewolf, Sigkill, Sigune, SiIP, Strive4Wisdom, Thetawave, Thornard, Tom Knox, Tsor, Törtchen, VampLanginus, W!B:, Wasserkeks, Wiegels, Wünschi, Zahnstein, 46 anonyme Bearbeitungen

Farbnachstellung *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=80796800> *Bearbeiter:* Asb, Barbulo, Boonekamp, ChristophDemmer, Daniel FR, Frau Braun, Gobu, Grey Geezer, JakobVoss, Jed, Kai.Werthwein, Karl-Henner, Kats-rule, Kku, Leider, MartinWoelker, Michael.chlistalla, Mikano, Murfatlar123, Nikater, RokerHRO, Schlurcher, Seefahrt, Siehe-auch-Löschel, Smial, Telcontar, Template namespace initialisation script, Timmelbimmel, Trustable, Uwe Gille, W!B:, Wikibert, WortUmBruch, 26 anonyme Bearbeitungen

Farbraum *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83832073> *Bearbeiter:* Acky69, Ahellwig, Al'be:do, Amanda, Andrika, Antonsusi, Avoided, BJ Axel, Balubaer, Benji, Boonekamp, Breinane, Breitbandkatze, Buchling, Byteemoz, Bücherhexe, CaZeRillo, Cactus26, Cepheiden, Chiliman, ChristophDemmer, D, David Hoeffler, DerHexer, Diwas, Docmo, Don Magnifico, Duesentrieb, ErikDunsing, FordPrefect42, Friedrich Graf, Geitost, Geof, Geos, Gleiberg, Guidod, Hardcoreraveman, Hermann.tropf, Hhielscher, Hildgund, Horst Frank, Innik, JakobVoss, JanRieke, Jkeyser, Jo Weber, Josef Meixner, Jpp, Kats-rule, Kemfar, KnightMove, Lyzzzy, MasterFaS, Nepenthes, Nikater, Nolispanmo, NullPlan, Nyks, Ot, Phrood, Pjacobi, Regi51, Richie, RokerHRO, Sixot, Slartibartfass, Srittau, Stefan Bartels, Stefan h, Suit, Taxus73, The Real Sancho Pansa, TheWolf, Thornard, TieR0815, Tom md, Ulfbastel, Uwe Gille, Video2005, W!B:, WAH, WaldiR, Wdwd, WikiJourney, Wolfgang1018, 76 anonyme Bearbeitungen

Farbreiz *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=75019211> *Bearbeiter:* Boonekamp, DerPaul, DiplomBastler, Friedrichheinz, Kallewirsch, Kats-rule, Kemfar, Kobako, Olaf Studt, Pittimann, Staro1, Stephan Schwarzbold, The Real Sancho Pansa, Ulrich.fuchs, Uwe Gille, 3 anonyme Bearbeitungen

Farbstoff *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83116056> *Bearbeiter:* 1000, 217, A.Savin, ABI08, Adi86, Afri, Aglarech, Aka, Aloiswuest, Atamari, Avoided, Azdak, Backwahn, Basscube, Bedwyr, Bender235, Bernhard Wallisch, Bierdimpfl, Boonekamp, Cepheiden, Chemiewikibm, Chemiker, Chesk, Ckeen, Complex, Corrupted, Cvf-ps, DTeezt, Dachris, Das f, DasFliewatüüt, Decide, Dell1701, Der Wolf im Wald, Der.Traeumer, DerHexer, Diba, DiplomBastler, Djones, Dogbert66, Don Magnifico, EUBürger, Elwe, Entlinkt, Ephraim33, Extrawurst, FK1954, Fristu, FritzG, GenJack, Genesis2093, GeorgHH, Grey Geezer, HDMN, HROestTypo, Hardcoreraveman, Heinte, Hendrik J., Hermannthomas, Hukukçu, Hystrix, Ich liebe ELKE, Interwiki de, JWBE, JamesCook22, Jordi, Jü, Karl-Henner, Kibert, Kku, Krawi, Kreuvf, Kuebi, Leyo, Localhost, MFM, MalteF, MarcoBorn, MarkusZi, MarquardtM, Martin Bahmann, Matzematik, Mellebga, Michael Merle, Mike Krüger, Mr.crispy, Muellerb, NEUROtiker, Nanotrix, NeoFisch, Nerenz, Nicor, Nimix13, Ninjamask, Numbo3, Parlament, Peter200, Pittimann, Pjacobi, Pr548, Primax, Prinzbaer, PumpingRudi, Qniemiec, QualiStattQuanti, Regi51, Rjh, Roland.chem, Roland1952, Rolf Schulte, Rosa Lux, Schulzjo, SigmaB, Sigune, Silenus, Singsangung, Small Axe, Soebe, Spinnerin, Spuk968, Sr. F, Stepa, Susanne und Stefanie, Swing, Thiesi, Thommess, Tönjes, Ulli Purwin, Umweltschützen, Ute Erb, Video2005, Vietinghoff, W!B:, Wiekie37, Wiedemann, Wiki-observer, Wurgl, Wikrazuul, YourEyesOnly, Zaiatsu, Zenit, Zinnmann, Zivilverteidigung, Zundelfrieder, 204 anonyme Bearbeitungen

Farbsättigung *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=81830346> *Bearbeiter:* APPER, Aholtman, Aineias, Andim, Andy386, Asb, Ben Ben, BerndGehrmann, Bildungsbürger, Boonekamp, Ciciban, Coprophiliac, Darkone, Dogcow, El Grafo, El., Hardcoreraveman, Hardenacke, Heinte, Helehne, Hubertl, Hydro, KaPe, LÜBBEEva, Madame, Matt1971, Mohahaddou, Nagy+, Origamiemensch, Peejay, Schewek, Silenus, Staro1, Textezurkunst, TiHa, Tuxman, Uwe Gille, W!B:, WIKIdesigner, Wangen, °, 23 anonyme Bearbeitungen

Farbtemperatur *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83760795> *Bearbeiter:* Ahoerstemeier, Anton, Asb, Between the lines, Bingbaum, Birger Fricke, Bjb, Boardersparadise, Boehm, Boonekamp, Brisbard, Cepheiden, Chrisusha, Chtaube, Crux, Cvk, D, Dogbert66, Don Magnifico, Dr. Zarkov, Dreiundvierzig, Dummschwätzerhochdreier, Erud, Fiselgrulm, FrancescoA, Gidoca, HaSee, He3nry, Invisigoth67, J budissin, JensG, Jkbw, Laza, Magnus Manske, MDe, Megatherium, Norbert, Onee, Ottomanisch, Panjasan, Paul Pot, PhilippWeissenbacher, Phrood, ProfessorX, RJensch, Raymond, Reenpier, Regi51, Rivi, Roland Berger, Saehrimnir, Saperaud, Schewek, Smial, Staro1, Stefan h, Tob!WanKenobi, Ulfbastel, W!B:, Wihler, Xzaranos, 62 anonyme Bearbeitungen

Farbton *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=80831571> *Bearbeiter:* Abdull, Boonekamp, BuSchu, Ckeen, DiplomBastler, Dreiundvierzig, GNosis, Hardcoreraveman, Hornisse, JMullerLeo, Jaellee, Josef.schneider, Kats-rule, Lax, LuckyStarr, Mmh, Norton1981, Pjacobi, TiHa, W!B:, Wst, °, 11 anonyme Bearbeitungen

Farbvalenz *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83966092> *Bearbeiter:* Boonekamp, DiplomBastler, Friedrich Graf, Hardcoreraveman, Kobako, Spuk968, Ulrich.fuchs, 2 anonyme Bearbeitungen

Farbwahrnehmung *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84207960> *Bearbeiter:* 24-online, ALE!, Abdull, Abu el mot, Adornix, Aka, Al'be:do, Alexander Z., Analemma, Andreas S., AndreasH, Anhi, Armin P., Arno Matthias, Asb, Astralkörper, Aths, Atompilz, Bertonymus, Biomenne, Blaufisch, Boonekamp, Brackenheim, BuSchu, Candid Dauth, Ce2, Cepheiden, Chiliman, ChristophDemmer, Claudioverfuert, Cleverboy, Cornelia-etc., Cosine, Cryptodirum, D, Der.Till, Der.Traeumer, DerHexer, Diba, Die zuckerschnute, Dietzel65, DiplomBastler, Don Magnifico, Drahreg01, DudY001, Dundak, ErikDunsing, FabianSch, Farino, Fish-guts, Florian Adler, Friedrich Graf, Fubar, Gerbil, Guidod, HaSee, Halbarath, Hardcoreraveman, Hardenacke, Hati, He3nry, Heinte, Henning M, Herbert Lehner, Hewa, Howwi, Hubertl, Ibn Battuta, Itu, Jens Liebenau, Jergen, Jodo, Jom, Josef.schneider, Joshiko, Kai11, Kats-rule, Kku, Konrad Lackerbeck, Kursch, Luegg, MBQ, Markus Mueller, Maus-78, Mdo, Michael Gäbler, Morten Haan, Nevermore4ever, Next2u, Nolispanmo, Nothere, Olaf Studt, Paddy, ParaDox, Peter200, Phiki, Philippindula, Philipp Wetzlar, Phrood, Pik-Asso, Pittimann, Pluckerwank, Prof. Holzfaller, R*elation, Randonneur, Regi51, Revanimus, Rgepkje, Ri st, Rjh, RokerHRO, Rufus46, Ruru, Schandi, Schlag.tel, Schlesinger, Schwalbe, Siggibeyer, SigmaB, Sinn, Smial, Solid State, Spawn Avatar, Spuk968, Stefan Kühn, Stefan h, Steffen84, Talaris, The Real Sancho Pansa, Thetawave, TiHa, Timk70, Tob! B., Tob!WanKenobi, Tschäfer, URS, Ulfbastel, Ulrich.fuchs, Uwe Gille, W!B:, WAH, WOB3333, Wellenlänge, WernerPopken, White rotten rabbit, Wolfgangbeyer, Worfo, Xenosophy, YourEyesOnly, Zaungast, Zenit, Zsller, 169 anonyme Bearbeitungen

Fluoreszenz *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83022256> *Bearbeiter:* Aegon, Agak, Aka, Akraviz, Archaeodontosaurus, BJ Axel, Balumir, Batrox, Biezl, Cephalotus, Chemiewikibm, Chtaube, Complex, Daffman, Denis Barthel, Don Magnifico, Dysmachus, El, Elchbauer, Elwe, Engie, ErikDunsing, Eschenmoser, Fischkopp, Flip666, FriedrichHerz, Geist, der stets verneint, Grottenolm, HaSee, Hadhuey, Herbertweidner, Hey, Hgrobe, Hoffmeier, Htp, Invisigoth67, Jan R, Jandalin, Jostar, JuTa, KaiMartin, Kaisersoft, Karl Bednarik, Karl-Henner, Kuebi, L3nnox, La Corona, Leider, Lorein, Mabschaaf, Martinl, McCourt, Media lib, Nerd, Nina, Nockel12, Olei, Paraplex, Pelz, Peter200, Physikochemiker, Pill, Pr548, Proxima, Pv42, Rhodendronbusch, Rilegator, Ringler, Roland.chem, Rosa Lux, Saehrimnir, Saibo, Schubbay, Sinn, Solid State, Spitschan, Spuk968, Sven Jähnichen, Talos, TdL, TheJH, Tsor, Tönjes, Ulfbastel, Ulm, Vico M. Kornborg, Vrumfondel, WAH, WOB3333, Wickey-nl, WoT, Yoda1893, Ysae, Zinnmann, Zoelomat, Zoph, 109 anonyme Bearbeitungen

Färben *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83438906> *Bearbeiter:* Aka, AndreD, AndreasPraefcke, Atamari, BLueFiSH.as, BS Thurner Hof, Bildungsbürger, Bücherhexe, Cholo Aleman, Cjesch, DerHexer, Diba, Désirée2, E-prinz, Hadhuey, Hardcoreraveman, He3nry, Hildensia, Howwi, Hydro, Ikiwaner, JD, Kats-rule, Kürschner, Lordnikon, LutzBruno, Lychee, M mb, Matt1971, Michael Merle, Mnh, N-roh, Nolispanmo, Nothere, Orci, P190, Pathogenicity, Peng, Peterlusting, Pfalzfrank, Philipp Kern, Prinzbaer, PumpingRudi, Raubfisch, RobertLechner, Roo1812, Saharadesertfox, Schwalbe, Sigune, Sinn, Spinnerin, Stefan, Sunshine22, W!B:, Wolfgang1018, Zenit, €pa, 60 anonyme Bearbeitungen

Färberwaid *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=82035939> *Bearbeiter:* Aka, Andy king50, Aragorn05, Barnack, Carbidfischer, Christian Günther, Denis Barthel, Denis Bonn, Don Magnifico, Florian Gerlach (Nawaro), Gleiberg, Griensteidl, Holderstock, Hydro, IrrwahnGrausewitz, Jmsanta, Mahlum, MarkusHagenlocher, Mecker, Michael Sander, Napa, Oliver s., Parzi, Pharaoh han, Ralferly, Ralph Hoessel, Schlesinger, Schubbay, Sfd, Sigune, Sinn, Sittendorfer, Tigerente, Vic Fontaine, W!B:, WOB3333, Wilhelmus, YourEyesOnly, 37 anonyme Bearbeitungen

Gegenfarbtheorie *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=80143108> *Bearbeiter:* -enzyklop-, 7Pinguine, Arno Matthias, Die zuckerschnute, Elwe, Greifensee, HAL Neuntausend, Hardcoreraveman, Heinte, Inkowik, Juni9, KnightMove, MBQ, Perrak, Pik-Asso, Proxima, TiHa, Uwe Gille, W!B:, 3P, 8 anonyme Bearbeitungen

Gelb *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=81521581> *Bearbeiter:* 217, A.Savin, Abfall-Reiniger, Acf, Aka, Alia 2005, Alkab, AndreasE, AndreasPraefcke, Anghy, Asthma, Attila v. Wurzbach, Avoided, BPA, BadPhil, Bakufu44, Baldhur, Bender235, BerndGehrmann, BjSch, Blaufisch, BoP, Boonekamp, Boxerfan, Calined, ChrisHamburg, Ckeen, Complex, Dachris, Daniel FR, Dealerofsalvation, Debiil, DerHexer, Diba, DiplomBastler, Dobby1397, Doc Taxon, Dodo von den Bergen, Dogbert66, Dr. Meierhofer, Drahreg01, Dreadn, Dudenfreund, Engie, Feccih, Felix Stember, Fg68at, Flostere, Fristu, FröhlicherHase, Gaius Marius, Gnu1742, Hafenbar, Hardcoreraveman, Hardenacke, Head, Hoosie06, Horst Frank, Hubertl, Hukukçu, Igge, Igrimmi12, Ikiwaner, Immanuel Giel, JD, Janschejbal, Jed, Jivee Blau, Jkbw, Joe Quimby, JuTa, Kaisersoft, Karl-Henner, Kats-rule, Kausel, Kh555, Kladson, Knechtling, Koala, Konquoror, Kuemmi, LKD, Liberatus, Lonewoelf, Luxo, Mabschaaf, Markus Mueller, Matthiasab, Meep, Meister, Mellebga, MichiK, Mikue, Misc, Modran, Moros, Muck31, Muscari, NiTenIchiRyu, Nikater, Nockel12, Ocrho, Ot, Parakletes, PhJ, Pitoe, Pittimann, Pjacobi, Polemos, Pomponius, RabbitsDad, Regi51, Roo72, Sabata, Schnargel, Semper, SubFreak, Sinn, Smial, Soebe, Solid State, Southpark, Staro1, Steef389, Suicidefury, The Evil IP address, Thorbojoern, TigerDriver, Tilla, Tobias b köhler, Tönjes, Ulli Purwin, Ulrich.fuchs, W!B:, WAH, WEBMASTER, Walter Falter, Wiegels, Wst, Xocolatl, Xqt, Yellowsuxx, Zaiatsu, Zaphiro, Überraschungsbilder, €pa, 130 anonyme Bearbeitungen

Glühlampe *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84188836> *Bearbeiter:* 08-15, 1-1111, 2nd lotgh, 888344, A.Rhein, AQ, Abdull, Abena, Acf, Adalbert, Ahellwig, Aka, Aleks-ger, AlexanderG, Alfred E. Neumann, Allander, Aloiswuest, Amphibium, Andreas Ley, Andreas82, Anton, ArchiSchmedes, Arma, Arne Schwarz, Arnoldius, Assianir, AxelMauruszat, Azby, BJ Axel, BLueFiSH.as, Batrox, Baumeister, Baumfreund-FFM, Ben-Zin, Benedikt.Seidl, Bergdohle, BerndB, BerndGehrmann, Beyer, Bib, Biezl, Bingbaum, Biologos, Blutfink, Boonekamp, Btr, Bundesstefan, BurghardRichter, Cepheiden, Checkpointarea, ChrisHamburg, Christian Spitschka, Cmoder, Codc, Cologinix, CommonsDelinker, Complex, Concept1, Conny, Coren, Crux, Cspan64, DaHoolC, Daeda, Dapete, DeepBlueDanube, DelSarto, Der Wolf im Wald, Der.Traeumer, DerHexer, Diba, Dickbauch, Diebu, Dishayloo, Docfeelgood3, Dominic Z., Dr. Manuel, Drdoht, EPsi, Echter, EherXtrem, El., Elwe, Empro2, EndymiOn, Entlinkt, Erhard Glück, EricPoehlsen, Fakten, Falk2, Fast healthy fish, FelixReimann, Filmtechniker, Filzstift, Fix 1998, Florian Adler, Flothi, Fomafix, Forrester, FritzG, GLammel, GNosis, Gabriel5, Gauner 1, GeorgHH, Gerbil, Gerhard51, Gerry1982, Gleiberg, Gloster, Grand-Duc, Gurt, HAH, HAL

Neuntausend, HaSee, Hadhuey, HaeB, Hans Eo, Hans Gabel, Hans W Esperanto, Hans-Jörg Günther, HansG, Hardenacke, Haseluenne, He3nry, HeGu, Head, Heihei, Heinrich L., Heinte, Helge Sterne, Hendrik J., Hgn-p, Hhdw1, Historyfreak97, Hoo man, Howwi, Hubi, Hydro, I-user, Iacklink, Igge, Inkowik, Itangast, Itu, Iwoelbern, JPB, Jailbird, Janka, Jean-Luc, JensBaitinger, Jergen, Jivee Blau, Jochen2707, JochenK, Joho345, Jomai, JuTa, Juesch, Juliane, Jwdietrich2, JoMa, K.Dingiling, KMJ, Kalypos, Kammerjaeger, Kanapee, Karl Gruber, Karl-Heinz Mitszschke, Kassander der Minoer, Kate Walker, Ketamin, Kh555, Kiu77, Kku, Klapper, Klausmach, Knoerz, Koerpertraining, KomA, Kookaburra, Krje, Krokofant, Kuhlo, Kurt Jansson, LKD, Lars52610, Liberal Freemason, Limulus, LogoX, LordPsycholus, Lowenthushio, LuisDeLiRio, Lusile, M-A-Z, MFM, Magnum9mm, Magnummandel, Magnus, Maikel, Marcel.kummer, Marcuskreusch, MarianSz, Marinebanker, Markuja, Martin-vogel, MattesKoeln, Mathäus Wander, Matzematik, Media lib, Megatherium, Melancholie, Mex, Mib18, Michael Gäbler, Milou, Minderbinder, Mnh, Modran, Moehre1992, Momomu, MovGP0, Mr. Mustard, MrsToast, Mvb, NEUROtiker, NewPapillon, Nobelium, Nocturne, Nolispanmo, Norbirt, Nothere, Numb03, Nyks, Oberelis, Oberlaender, Oerho, Odrechsel, Olei, Ollifant, Onkel Dittmeyer, Orci, Origamiemensch, Ot, P ev, Pemu, Pendulin, Peter Wiegell, Peter Wöllauer, Peter elektro, Peter200, Peterlustig, Pfalzfrank, Philipendula, Phrontis, Phrood, Pischdi, Pistazienfresser, Pittimann, Pjacobi, Plasmagunman, Playmobilonhishorse, Poc, Politikaner, Putput, Quark48, Quaz, Qwqchris, Rabe19, Radlfahrer, Rai42, Rainald62, Rainer Bielefeld, Rainer Lippert, Ralf Pfeifer, Ralf Roletschek, Rat, Rdb, Regi51, Reinhard Kraasch, Reinraum, René Mettke, Revvar, Riki1979, RoRaiMa, RobertLechner, Roest, RokerHRO, Roland Berger, Rolf Zeller, Roteraecher, Rotkaeppchen68, Rsuesbrr, Rufus46, Saehrimmir, Saibo, Saint Etienne, Saldek, San Andreas, Sansculotte, Saperaud, Sarastro, Saure, Schaengel89, SchallundRauch, SchirmerPower, Schniggendiller, Schrauber5, Schreibvieh, Schusch, Sebs, SecretDisc, Secretgardener, Seewolf, Segelboot, Sellhorn, Senfgeist, Septembormorgen, Silberchen, Sinn, Slartibartfass, Small Axe, Snipsnapper, Snorky, Snotty, Srbauer, Srvban, StYxXx, Staro1, Stefan Kühn, Stefan h, Steffen2, Stern, Stolp, Sunrider, TB42, TZV, Taadma, Takezo, Tango8, Tarantelle, Tetriz L, The pyr o man, TheBug, TheK, Thogo, Thomas, Thorjoern, Til Lydis, Tob1 B., Tobias1983, Tobnu, Tohma, TomAlt, Traut, Trinsath, Tzor, Tsui, Tubas, Tuxman, UW, Ulfbastel, Umweltschützen, UvM, Uwe Gille, Vogtadi, Voyager, W-sky, WAH, WHell, Wasabi, Waterborough, Wdwd, Wefo, Wfstb, Wiebelfrotzer, Wiegels, WikiNick, Winderbinder, Mnh, WinfriedSchneider, Wiska Bodo, Wkpd, Wnme, Wolf32at, Wolfgang II, WolfgangSchmid, Wondigoma, Wst, Wzwz, XRay, Xeo, Xocolatl, Xorx, Xqt, YourEyesOnly, Zahnstein, Zaphiro, Zbiasimone, Zimbosmurf, Zinkand, 506 anonyme Bearbeitungen

Grundfarbe *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84170201> *Bearbeiter:* -donald-, A.Savin, Ademant, Adornix, Aexus, Aka, AndreasB, Arno Matthias, Asb, Bautsch, Blomike, Boonekamp, Centic, Chrislb, ChristophDemmer, DasBee, Der.Traeumer, DerHexer, Dobby1397, ErikDunsing, Euku, Euphoriceyes, Firefox13, Flominator, Gleiberg, HalbmOnd, Halsbandsittich, Harald Küppers, Heinte, Herbertweidner, Herr von Quack und zu Bornhöft, Id, JamesCook22, Jodo, Jordi, Juesch, Kats-rule, Kibert, Klapper, KlausFueller, Komischn, Krawi, Lateiner, Leon, Liberaler Humanist, Lyzzy, Marc Gabriel Schmid, Mikue, Moros, Muddl1, Myr, Odin, Oxymoron83, P. Birken, Paddy, Pittimann, Rax, Rdb, Rolf Zeller, Schexpir, Schubbay, Sempser, Siehe-auch-Löschher, Sitic, Sloyment, Sozi, Spuk968, Staro1, Steffen84, Suricata, Synapsel, TAXman, Tcommbee, TiHa, Tkarcher, TomK32, TruebadiX, Tzor, Turpit, Ulli Purwin, Wdso, WikiJourney, Wipape, Zxb, 108 anonyme Bearbeitungen

Grün *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84043551> *Bearbeiter:* A.Savin, Aka, Alex1011, Alexandra lb, Andre30c, AndyNE, Angela, AquariaNR, Attila v. Wurzbach, Avoided, Backlit, Bakufu44, Baumfreund-FFM, Baumst, Bertonymus, BjKa, Björn Bornhöft, BoP, Boonekamp, CHRSD, Calined, Carport, Chemiewikibm, ChrisHamburg, Christian Lindecke, Ckeen, Code, Complex, Daniel 1992, Daniel FR, Danogo, DerHexer, Diba, DiplomBastler, Dogbert66, Dr. Meierhofer, Draheg01, EvaK, Fg68at, Fiege, FIH, Flominator, Fomafix, Fubar, Fuchsmario, Greenhorn, Halbarath, Hans J. Castorp, Hardenacke, Head, Hedwig Storch, Hoosic06, Howwi, Ian Dury, Immanuel Giel, Inkowik, JD, Jed, Jergen, Jörg Knappen, Kandschwar, Karl-Henner, Kats-rule, Kausel, Kh555, Klapper, Koala, Krawi, Kriddl, Liuthalas, Louis88, Maix, Markus Mueller, Martin-vogel, Michael32710, MichaelB., MichiK, Miglincit, Mkogler, Mnh, Mo4jolo, Nanouk, NiTenchiRyu, Niemot, Nockel12, Olei, Ot, Ottomanisch, Parzi, PeeCee, Peng, Peter200, Pfalzfrank, PhJ, Pittimann, Pjacobi, Pocci, Pyrenaien, RacoonyRE, Rauenstein, Rax, Regi51, RokerHRO, Roo72, Sanandros, Scrapjay, Seewolf, Sicherlich, Siebzehnwolkenfrei, Siehe-auch-Löschher, Sinn, Small Axe, Spuk968, Stefan h, Stefan64, Suricata, THWZ, The Evil IP address, Thogo, ThorstenS, Tilla, Tim Pritlove, Tob1 B., Tobias b köhler, Uwe Gille, Volkrich, W!B.; Walter Falter, Westiandi, Wiegels, Wikipeditor, Williwalli, Wolfgang H., Wst, Xqt, YourEyesOnly, Zaiatsu, Ärhus, Überraschungsbilder, Λοῦκος, €pa, 181 anonyme Bearbeitungen

Helligkeit *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=77406214> *Bearbeiter:* Aka, Al'be:do, Andreas -horn- Hornig, Anhi, Anton, Augiasstallputzer, Berengar, Boonekamp, ChristophDemmer, Diba, Don Magnifico, Friedemann Lindenthal, Geof, Gratisaktie, HaSee, Head, Howwi, InikOfDoom, Jens m0, Jürgen Schmidtke, Kh555, Matzematik, MovGP0, Nocturne, OgeRetla, Phrood, Reinhard Kraasch, Rivi, Saperaud, Skerdilaid2007, Srbauer, Staro1, Stefan2, Suhadi Sadono, Superbass, Tobias Bergemann, Uwe Gille, W!B.; WikiJourney, WikipediaMaster, Wipape, Xeph, Xorx, YMS, Zaphiro, Zaungast, 29 anonyme Bearbeitungen

Infrarotstrahlung *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84160067> *Bearbeiter:* 1-1111, 100 Pro, 217, AS, Aconcagua, Aineias, Aka, Alraunenstern, AlterVista, AndrewPoison, Andy king50, Anhi, AntiBMH, Anton, Arno Matthias, Avoided, Backtrieb, Backwahl, Bierdimpfl, Big.N, Björn Bornhöft, Blue Lou, BoP, Boonekamp, Bukk, Carbidfischer, Centic, Cepheiden, ChristophDemmer, D, D-Kuru, D42, Dalton23, Daniel Küstner, Dantor, Deerooy, Der Chronist, Dnaber, Don Magnifico, Dschen, Dullnraamer, Einstieckvombrot, Ekitz, Elya, EvaK, Frank Jacobsen, Frech, Fritz Jörn, Fuenfundachtzig, Fullwar, Gdarin, Geoemyda, Gravitophoton, Gustav73, I-user, Isheden, Jackalope, Jergen, Jodoform, Jpp, Juesch, Juliabackhausen, Kas101, Krje, Langläufer, Liquidat, Martin-vogel, Martin1978, Matt1971, Matzematik, Maxliebscher, Mcrx, Mib18, MichaelB., Mnh, Monarch, Mst, Muck31, Mueck, NCC1291, Nicolas G., Nitec, Norbirt, Norro, Rainer, OecherAlemanne, Ot, Paddy, Pendulin, Pessottino, Peter200, Pff, Philipp Wetzlar, Pion, Pjacobi, Prof. Dr. med. Gerd Hoffmann, Prometeus, Proxima, Rainald62, Rayx, Rcsu, RedPiranha, Robert Weemeyer, Rosa Lux, Saibo, Saski, Schewek, Schlesinger, Schmelzle, Schubbay, Schusch, Schwobator, Scooter, Seewolf, Sinn, Small Axe, Soa, Spawn Avatar, Stuby, Suit, Superplus, TKN, TdL, Thire, Thomasscheler, Thorjoern, Tob1 B., Tob1WanKenobi, Trg, U3, Ulfbastel, W.alter, Wegner8, Wellness69, Westiandi, Wst, Wächter, YourEyesOnly, Yuhter, Zaiatsu, 226 anonyme Bearbeitungen

Komplementärfarbe *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83996924> *Bearbeiter:* Alexander Z., AlexisM, Anonyma, Asb, Avoided, Boonekamp, Bücherwürmlein, ChristophDemmer, Der.Traeumer, Dullnraamer, Entlinkt, Felix Stember, Florian Adler, Frau Braun, Golden arms, Goto Dengo, HaeB, Hardcoreraveman, Heinte, Jergen, Kats-rule, Koala, Krawi, Kwer Wolf, MFM, Martin1978, Mikue, Nephelin, PeeCee, Peter200, Philipd, Pittimann, Raymond, Regi51, Reinhard Kraasch, Renekaemmerer, Rybach 5, Schwarzseher, Scooter, Seewolf, Septembormorgen, Shadak, Sigune, Sinn, Spuk968, Stefan2, Strangerranger, Thornard, TiHa, Tubo, Tönjes, Umweltschützen, Uwe Keim, W!B.; WAH, Wolf32at, WortUmBruch, 106 anonyme Bearbeitungen

Kontrast (Optik) *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84009540> *Bearbeiter:* Andreas -horn- Hornig, Andys, Anton, Armin P., Asb, Avoided, Benzen, Berklas, Bernd vdB, Blaufisch, BoP, Crux, Dantor, Darkone, Dnaber, Dundak, Engie, Euku, Fab, Friedemann Lindenthal, Friedrich Graf, Gohnarch, Hutschi, Inkowik, JCS, Jivee Blau, Kalli R, Leider, Loh, Luestling, Matzematik, Michail, MlWEc9JTnv, Mnh, Myr, Ninjamask, Norro, Obersachse, Ot, PassePorte, Peter200, RSX, Ralf Roletschek, Smial, Sfn, Sukarnobhumibol, ThePan, Tob1 B., W!B.; WortUmBruch, 66 anonyme Bearbeitungen

Körperfarbe *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=82706653> *Bearbeiter:* Aka, Andys, Boonekamp, Cepheiden, Darkone, Das Volk, Diba, Dogbert66, Duesentrieb, Exil, Freedomsaver, Fristu, Gancho, Hardcoreraveman, Hydro, Inkowik, Kats-rule, Logograph, Peterlustig, Phil41, Pietz, Pittimann, Rainbowpickett, Rosa Lux, TiHa, Tönjes, UTH, 16 anonyme Bearbeitungen

Lab-Farbraum *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83752506> *Bearbeiter:* 790, Al'be:do, Alinka00, Boonekamp, CIECentral Bureau, ChristianPfeiffer, ChristophDemmer, Ckeen, Draheg01, Emdee, Eschbaumer, Euphoriceyes, Gidoca, Görgel, HaSee, Hardcoreraveman, JakobVoss, Konicaminolta, Leider, MasterFaS, Mnh, Mukk, Nexcis, Polluks, Raycluster, Regi51, Schweikhardt, Sunny Co, Sven Boisen, Swissjoker, Texus73, The Real Schanco Pansa, TiHa, Tom md, Uwe Gille, WikiJourney, Yarin Kalu, 55 anonyme Bearbeitungen

Laser *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84223295> *Bearbeiter:* 7Pinguine, 9mag, A.Savin, ABoe, Aburgermeister, Achak, Aegon, Aglarech, Ahellwig, Ajiro, Aka, Akkarin, Aloismaierl, Anagrom,Ataf, Andreas 06, Andreas aus Hamburg in Berlin, Andys, Anony, Arcturus, Arist0s, Arnero, Atomos, Autoseam, Avoided, BJ Axel, BLueFiSH.as, Badphantom, Bapho, Barbarossa, Baumi, Ben-Zin, Berklas, Bernd vdB, Bernhard Wallisch, Besserwisserhochdrei, Bezirk32, Bildungsbürger, Blart, BoP, Boehm, Boemmel's, Borowski, Bouwe Brouwer, Brackenheim, Brunosmonsara, Bu11z3y3, Bücherwürmlein, Cdag, Cepheiden, Chesk, ChrisHamburg, ChristophDemmer, Cjesch, Clemensfranz, Cliffhanger, Cnagl, Cocker68, Commander-pirx, Complex, Conny, Conversion script, Crux, Cvf-ps, Czeko, D, D.Derigs, D235, Danh, Daniel 1992, Darina, DasBee, David Saal, David zwicker, Deep Blue, Dennishot, Der Reisende, Der-akio, Der.Traeumer, DerHexer, Dermatzeimnetz, Dgs2000, Diba, Dilerius, Djkillerkassette, Dogbert66, Don Magnifico, Dr.phees, Dreizung, Driessel, Druffeler, Dudenfreund, Düsentrieb, Eckart.gerster, Eins, El, ElTom, Elwe, Emdee, Emil Bild, Encyclopedist, Engie, Endlinkt, Ephraim33, Epix, Euphoriceyes, Evkienlin, F. Saerdna, FEEX, Fastfood, Fechi, Feudiable, Fgb, Fink, Florian Weber-alt, Flynx, Fmrauch, Fort-Knox, FrankyS, Gardini, Gaussianer, Geiseric77, Geof, Geolord, Gerbil, Gerd Breitenbach, Gerd Marquardt, Gerlach, Gflaesche, Ghw, Glenn, Gogowitsch, Gravitophoton, Guety, Gurt, HAL Neuntausend, HaSee, Hadhuey, Hannes Röst, Hans J. Castorp, Hape, Hardenacke, Harro von Wuff, HartmutG, He3nry, Hei ber, Heikoschmitz, Heinte, Henning Ihmels, Herbertweidner, Hey, Hgroetz, Hhdw, Hhoffmann, Hierakares, Hijackal, Hoo man, Hps, Hubertl, Hubmayr, Hufi, Hunding, Hweihe, Hydro, Iija, Ing. Schröder Walter, Inkowik, Ireas, Itu, J. 'mach' wust, JA SC, JFK@Berlin, Jaellee, JamesCook22, Jarlhelm, Jed, JensBaitinger, Jergen, Jivee Blau, Jkbw, JoBa2282, JoWi, Jofi, Jonasbinding, Joni2, Jonischloni, JonnyJD, Jpp, Juesch, Julienissa, KaHe, KaiMartin, Kako, Karl Gruber, Karl-Henner, Kein Einstein, Kh555, Kibert, Kku, Klaus1234567890, Knocker, Koppi2, Korrekturleserdeutsch, Krawi, Krd, Kricki, Kuhlo, LKD, Lali, LaserFrek, Lchris, Leider, Leonardo, Lichtenstein, LivingShadow, LordPsycholus, LuisDeLiRio, Luk, Lupinoid, Löschfix, M0nsterxxl, MBq, MFM, Manecke, Manfred.peter, Marc Layer, Markuja, Marsupilcoatl, Martin-vogel, Matlechner, Matzematik, Maxus96, Mcrx, Meier99, Melancholie, MeraX, Merlissimo, Metoc, Mfb, Mgehrmann, Miaow Miaow, Michail der Trunkene, MichiK, Michl123, Microsys, Mikue, Mk-stuff, Mnh, Moguntiner, Mopskatze, Moros, MovGP0, Muck31, Mueslifresser, Musik-chris, Ne discere cessa!, Netpilots, Nicolas G., Nightstalker, NneOfu, Nosfi, Numb03, Okatjerute, Oleg89, Olei, Onno, Ot, Owlton, Oxydo, Paddy, Pediadep, Peter200, PeterFrankfurt, Philipweb, Piepmatz, Pik-Asso, Pill, Pittimann, Pjacobi, Ponte, Proxima, Pyrrhus, Quant3-kurzstrumpf, Quartl, Querverplänkler, Quintilis, RJensch, RacoonyRE, Raicker, Regi51, Rhododendronbusch, Rjh, RoB, Robb, RonaldRichter, Rosa Lux, Roteraecher, Rufus46, Rynacher, S.K., STBR, Sadako, Saehrimmir, Sangiovese, Schlurcher, Schnargel, Schnulli00, Schweikhardt, Scooter, Scorpion2211, Sebastian Flothow, Seewolf, Sentry, Septembormorgen, Shces, Siehe-auch-Löschher, Sinn, Sitacuses, Small Axe, Smann, Smegger, Smeyen, Smokingstone, Solid State, Solution-systems, Sonaz, Southpark, Spuk968, Staro1, Stefan, Stefan Kühn, Stefan h, StefanPohl, Stefanobasta, Stefre, StromBer, Suhadi Sadono, Superplus, Synapse, Systemdefender, TBMD, TH2009, Tabatonga, Taftas, TdL, Telis008, Thogo, Tilla, Tilo, Tob1 B., Toby86, Tom md, Tommy Kellas, Torsten Bätge, Traitor, Trg, Twes werf, Tönjes, Ulfbastel, Ulrich.fuchs, Umweltschützen, UncleBenZ13, Unscheinbar, Unsterblicher, UvM, Uwe Gille, V.R.S., VCSEL, VanGore, Vandierieth, Voere, Walter, WIKIdesigner, Wasabi, Wdwd, Webchen, Westiandi, Wiesbaden, Wikifreund,

Wikitechniker, Wisem, Wispanow, Wolf32at, Wolfgang Feld, Wolfgang H., Wolfgang.geithner, Wolfgangbeyer, Worz, Woto, Xorx, Xvlun, Xxxsemoi, Yahp, Yarin Kaul, YourEyesOnly, Ytterbium, Zaugast, Zbisasimone, Zenit, Ziko, Zinnmann, ^{3p}, Александр, 738 anonyme Bearbeitungen

Leuchtdiode *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84242481> *Bearbeiter:* -jha-, .rhavin, 1-1111, 32X, AHZ, Acetobacter, Adornix, Afrank99, Ahellwig, Aka, Akkakk, Alcibiades, Aleks-ger, AndreasFahrad, Andergan, Anhi, Anton, Apelabs, Ar-ras, Aragorn2, ArtMechanic, Astrobeamr, Atomos, Avoided, Azer, BJ Axel, Bahnmoeeller, Baird's Tapir, Baumfreund-FFM, Berlin-Brot88, Berlin-brot, Besserwisserhochdrei, Bettermaker, Bildungsbürger, Biolippi, Björn Bornhöft, Blah, Blocklight, Boehm, Boemmels, Bombenleger, Boonekamp, Brisbard, Brummfuss, Bundesstefan, Bzzz, Büchervürmlin, C-M, C. Pelant, Calleostro, Camaris, Carbidfischer, Cepheiden, Cgwalther, Chemiefrik, ChrisHamburg, ChristophDemmer, Claudia1220, Cliffhanger, Codespoetry, Complex, Crux, Cyberstels, D, D.Schiebener, DaB., Daniel-staemmler, DarkScipio, Darkone, DasBee, Dazzafact, Degreen, Denis1992, Denis92, Der Burgstädter, DerTraeumer, DerHexer, derRegenerative, DevilKevin, Diba, Dp99, Dr. Thomas Fink, E-Pawel, Ebe-solutions, Einstückvombrot, El, Elchbauer, Encyclomaniac, Engie, Erik Streb, Erni35, Ertua, Europkauf, F.Schäfer, Fabian R, Fairplay, Faxel, Fecchi, FelixReimann, FischX, Fischkopp, Flominator, Flyout, Fomafix, Frank Klemm, Freak 1.5, FritzG, Frog87, Fubar, Fuenfundachtzig, GFJ, GS, Geist, der stets verneint, Gerbil, Gerhardvalentin, Grottenolm, Gschuetz, Guandalug, H005, HAL Neuntausend, HaSee, Hadhuey, HaeB, Halbarath, HannesH, Hardenacke, Hardy42, Harry20, Haselunne, Hauke Haller, He3nry, Head, Heidas, Heldenberg, HenrikHolke, Herbertweidner, Hermannthomas, Honge, Howwi, Hu12, Hubertl, Hugomoto, ILA-boy, IOOI, IXNAY, Ilogos82, Ireas, Isis2000, JMetzler, JN, Jacktd, Janka, Jed, Jens Liebenau, Jergen, Jivee Blau, Jkbw, Jodoform, Joho345, Jpp, JuTa, Juesch, Jussufftükai, Jürgen Fleck, KaiMartin, Kaisersoft, Kapeka, Karl Gruber, Katzenbaer, Kh555, Kibert, Kiu77, Kku, Klugschnacker, Knoerz, Knoppen, Kookaburra, Kopoltra, Krawi, Kristjan, Kubrick, Kuebi, Kuhlo, LEDisVET, LKD, LabFox, Laubbaum, Ledroom, Leider, Lewa, Liberatus, Lichtoptimierung, Logograph, LonelyPixel, Louis Bafrance, Lutz Terheyden, Mönsterxxl, Magnummandel, Maikush123, Manecke, ManfredoX, Manorainjan, MarianSz, Markus Mueller, Markus Schweiß, MarkusHagenlocher, Martin-vogel, Martin1978, MartinWill, MatteX, Matthias Schneider, MdE, Megatherium, Melancholie, Mens sana, Miaow Miaow, MichaelFrey, Milou, Mipani, Mmwiki, Mnh, Momomu, MovGP0, Movinglight, Mr.checker, McShaos, Muck123, Nac Mac Feeble, Nagy+, Nd, Neil Hilist, Nepenthes, Netspider, Neu1, Nicolas17, Nikai, Nikon roy, NobbiP, Nolispanmo, Norbirt, Norro, Nucle4r, Occho, Odo2004, OecherAlemanne, Onee, Ordnung, OsGr, Ot, OttoK, Oxyomoron83, PDD, PaulBommel, Paulchen-Weimar, PeeCee, Pemu, Pendulin, Peter Schmalenbach, Peter Wöllauer, Peter200, Pfalzfrank, Philip1307, Philipendula, Phrood, Pittimann, Pohli, PsY.cHo, Qdr, Quadratissimo, Quelix, Querverplänkler, R. Engelhardt, Ra'ike, Rainald62, Rainer Lippert, Ralf Pfeifer, Rasko, Rauhgaus, Reaper35, Red hat, Redf0x, Regi51, ReinerSpass, Reinhardt, Renekaemmerer, Revvar, Richard U, RokerHRO, Roo1812, S.Lukas, Samulat, Santiago2000, Saperaud, Scavenger86, Schily, Schlurcher, Schusch, Sebastián San Diego, Seewolf, Segantini, Semper, Sewa, Shego123, Shepard, Shmia, Silberchen, SilverSrv, Sinn, Skilleder, Small Axe, Smex, Smial, Solid State, Sonic74, Soundray, Spazio, Spitschan, Spuk968, StYxXx, Standardizer, Staro1, Steef389, Steevlein, Steffen, Steffen, Steve m, Steve11186, Stfn, Stromf0k, Stw, Sundance Raphael, Superplus, SvonHalenbach, Szeidler, Taadma, Taner16, Tango8, The Stefan, TheBug, TheK, TheReincarnator, TheWolf, Thgoiter, Thorbjørn, Thuringius, To old, Tob1 B., Tobias1983, Togo, Toutiofix, Tregobi, Trendlicht, Trendlicht24, Trickstar, Tönjes, UW, Ulfbastel, Urgent necessity, Uwe Gille, Uwe Rumberg, Valo, Video2005, Vulpeculus, WAH, Wdwd, Weakiwewolf, Westiandi, WikiPimpi, Wikibach, Winfried Mueller, Wispanow, Wladi001, Wo st 01, Wollschaf, X-Weinzar, Xemu, YMS, Yagosaga, YourEyesOnly, Zahnstein, Zbisasimone, Zefram, Zeitan, Zwölfv0lt, \ldblquote, `Kreiszuhol`, Алиса, Михајло Анђелковић, 8, 917 anonyme Bearbeitungen

Licht *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84076264> *Bearbeiter:* 1001, 1971markus, AHZ, Aconagua, Agadez, Aka, Allen McC., Amtiss, Andreas 06, Andys, Aragorn05, ArtMechanic, Asthma, Avatar, Avoided, B.gliwa, Baumst, Belsazar, Ben-Zin, Bernhard Wallisch, BeroHH, BesondereUmstaende, BigBen666, Bildungsbürger, Bingbaum, BitterMan, Björn Bornhöft, BlackLight, Boonekamp, Boson, Carol.Christiansen, Ce2, Cepheiden, Chemph, Chewey, ChrisHamburg, ChristianHeldt, Christof Beuter, Christoph Wagener, ChristophDemmer, Chtaube, Codespoetry, Comm. makataa, Commander-pirx, CommonsDelinker, Complex, Connolly, Crux, Cyclosa, D, Dêr devil, Daniel FR, DasBee, Dendzhuser, DerTraeumer, DerHeld, DerHerrMigo, DerHexer, Diba, Diebu, Dietze165, Dns, El, Elektronenhirn, Engie, Entlinkt, Epix, Ersatzersatz, Euphoriceyes, Ezrimerchant, FEXX, Fliegender Fisch, Florian Adler, Fridel, FriedhelmW, Friedrichheinz, Frquadrat, GNosis, Garnichtsoefach, Geist, der stets verneint, Gerhardvalentin, GoGi, Goldensurfer, Gravitophoton, Guandalug, HaSee, Hadhuey, HaeB, Hagbard, Halbarath, Hank van Helvete, Hans J. Castorp, He3nry, Head, Hei ber, Hendel8, HerrSievers, H Hoffmann, High Contrast, Historiograf, Holodoc, Horst Frank, Howwi, Hubertl, Hydro, InikOfDoom, Inkowik, Isheden, JD, Jed, Jens Liebenau, Jergen, Jesi, Jim Panse, Jivee Blau, JochenK, Joystickier, Jpp, Juesch, Jörg-Peter Wagner, Kai111, KaiMartin, Karl-Henner, Kein Einstein, Kibert, Kissaki, Kliv, Knoerz, Konrad F., Krawi, LC, LKD, Laserator, Laubbaum, Leipnizkeks, LemiNW, Lenny222, Leyo, Logograph, Luha, Löschfig, Mafeu, Magnummandel, Markus Mueller, Martin Aggel, Martin-vogel, MartinThoma, Matt1971, Matze6587, Mikue, Mnh, MovGP0, Muck31, Ne discere cessa!, Neitram, Netnet, Nicolas G., Night Ink, Nightstalker, Nikkis, Normalo, Numbo3, OTTO.R.M., OecherAlemanne, Olei, Ot, Paddy, Pbro, Pendulin, Perrak, Peter200, Peymanpi, Pfalzfrank, PhJ, Philipendula, Philipp Wetzlar, Phrood, Pittimann, Proxima, Rainer Bielefeld, Regi51, ReiKi, Rfc, Roo1812, Rosa Lux, Rufus46, Rüdiger, STBR, Saehrimmer, Sandale, Schaengel89, Schewek, Schniggendiller, Schuetzm, Schusch, Scooter, Sebmán81, Segelzwerger, Sinn, Sir Mathew, Small Axe, Smial, Solid State, Spawn Avatar, Spuk968, StG1990, Stefan h, StefanPohl, Stylor, Sypholux, TBMD, Taadma, Tango8, Thomas7, Thorbjørn, ThorstenS, Tillniermann, Tinz, Tjö, Tob1 B., Tobias1983, Traitor, Trendlicht, Triebtäter, Tönjes, Ulfbastel, Ulm, Umweltschützen, UvM, Uwe Gille, V.R.S., W'IB., WAH, Wellenlänge, Wikipediaphil, Wipape, Wirama, Wolfgangbeyer, Xls, Xqt, Youandme, YourEyesOnly, 449 anonyme Bearbeitungen

Lichtfarbe *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83714808> *Bearbeiter:* 888344, Aka, Birger Fricke, Boonekamp, Cepheiden, Duesentrieb, Filmtechniker, Frank Helbig, Hardcoreraveman, IP-Wesen, J.M.F. Berlin, Jivee Blau, Johnny Controletti, Kats-rule, Krawi, Kursch, LonelyPixel, Manoriidus, Motorpsycho, OecherAlemanne, Paul Pot, Philippe Ulmann, Pittimann, Rosenzweig, Schmitt, Seewolf, Ulfbastel, Video2005, Vigilius, YuKove, 29 anonyme Bearbeitungen

Lichtquelle *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83208257> *Bearbeiter:* Acme, Aditu, Anton, Bernard Ladenthin, Boonekamp, Ce, CeEstMoi, Chrisfrenzel, Chtaube, CollectiveStupidity, Complex, Crux, DaHoolC, DanSy, DasBee, DerTraeumer, Don Magnifico, Felix Stember, Fleasoft, Frank Murmann, Hecate, Herr Th., Hydro, Imladros, Ing. Schröder Walter, Invisigoth67, Jens Liebenau, Jhartmann, Jivee Blau, Johnny Yen, Juliabachhausen, Kaisersoft, Kh555, Kh80, Kku, KresseWuchtNo5, Leonard Vertighel, MichaelSchoenitzer, Michail, Momomu, Muck31, Nelson95, Niemyerstein, Peter Wöllauer, Peter200, Pinnipedia, Pittimann, Proxima, R*elation, Ri st, STBR, Seewolf, SigmaB, Spuk968, Suedwand, Suhadi Sadono, Theskull, Ulfbastel, Unsterblicher, Voevoda, W'IB., Wasabi, Wispanow, Zwölfv0lt, 65 anonyme Bearbeitungen

Lichtspektrum *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83989767> *Bearbeiter:* A.Savin, Aka, Asb, Ben-Zin, Blah, BoP, Ce, Ce2, Cepheiden, ChrisHamburg, ChristophDemmer, Chstdu, Chtaube, CommonsDelinker, Daniel 1992, DerAndre, Don Magnifico, Duesentrieb, El, Entlinkt, Euku, GNosis, Hbrucker, He3nry, Hedwig in Washington, Herbertweidner, Hubertl, Hypnotoad, Inkowik, Isderion, Janneman, Jesi, Jivee Blau, Johanna R., Kai11, KaiMartin, Kein Einstein, Kibert, Konrad F., Krawi, LivingShadow, Magnus Manske, Manoriidus, Markobr, Markus Mueller, Martin-vogel, Mikue, Minutemen, Mnh, Orci, Pc fish, PeeCee, Peter200, Phrood, Pittimann, Pjacob, Proxima, Pyrrhus, Querverplänkler, Ralf Roletschek, Rapober, Regi51, ReiKi, RoBri, Rufus46, STBR, Saperaud, Schewek, Schulzjo, Scooter, Semper, Spawn Avatar, Staro1, Steschke, Tesslo, Thomas G. Graf, Thorbjørn, Thuringius, Toffel, Ulfbastel, V0d4n, VinylVictim, W'IB., WAH, Wilhans, Wipape, Wolfgang1018, Wutzofant, Xeriox, Zwoenitzer, 101 anonyme Bearbeitungen

Liste der Farben im Farbkreis *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83030085> *Bearbeiter:* Aka, AndreasE, Atamari, Boonekamp, Clemensfranz, Darkone, Diarrhoe, DiplomBastler, Fomafix, HaSee, Hardcoreraveman, Kats-rule, Konsumopfer, LC, Lex82, Martin-vogel, Memex, Oceancetaceen, Parakletes, Saperaud, Schwalbe, Sinn, Traitor, W'IB., Zenit, 9 anonyme Bearbeitungen

Magenta (Farbe) *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=81199068> *Bearbeiter:* Abdull, Aleks-ger, Androl, Androsch, Asthma, Bender235, Birger Fricke, Boingdil, Chaddy, Christianh, ChristophDemmer, Cjesch, César, Daniel FR, DerPaul, DiplomBastler, Dogbert66, Draheg01, Emkaer, Falkue, Filmtechniker, Flatlander3004, Flominator, Fogrfry, FredericII, Gnu1742, Head, HolgerB, Karl-Henner, Kats-rule, Kala, Lax, Lexx105, Martin-vogel, Masterthe1, MichiK, Mps, Nd, Nikater, Nolispanmo, Peter200, Petzsch, Pittimann, Rat, Sadduk, Smeyen, Stummi, Stw, TheK, Tilla, Timbod, Tobitoaster, WAH, ^{3p}, 31 anonyme Bearbeitungen

Metamerie (Farblehre) *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83909940> *Bearbeiter:* 790, Al'be:do, Analemma, Asb, Birger Boldt, Boonekamp, Chtaube, Crux, Daniel FR, DasBee, DerTraeumer, DiplomBastler, ElRaki, Friedrich Graf, Hardcoreraveman, HenHei, Hutschi, Kats-rule, Kku, Krokofant, LeSch, Leider, MBq, MartinWoelker, Nolispanmo, Pjacob, Poc, Rubidio, STBR, Smial, Stefan h, TiHa, Uwe Gille, VinylVictim, W'IB., Wleklinski.de, Wolf32at, Xorx, Zoph, 43 anonyme Bearbeitungen

Netzhaut *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=81253587> *Bearbeiter:* .Mag, 24-online, A.Savin, Aglarech, Aka, Aleator ca, Anastasius zwerg, Andre Engels, AndreasE, Applepie, Aquis, Arnero, Arno Matthias, Asthma, Autofan, Avoided, Bas89, Ben-Zin, Bertonymus, BoP, Buffty, Bärlach, C-pu, Centic, Cepheiden, Chrisfrenzel, Christian Storm, ChristophDemmer, Claudioverfuert, Cruzer83, Cymothoa exigua, D, Dante hd, Darev, Darkone, DasBee, Dbach, DerHexer, Doclester, Doudo, Dr.Jastrow, Drahrub, Drifty, Drwulf, Earendil, EL, ErikDunsing, Faxel, Filzstift, Freak 1.5, GNosis, Gancho, Google, H. de Groot, Haeber, Hafenbar, Hans Koberger, Hansele, Hartpete, Hati, Herbertweidner, Hopsee, Ichmichi, InikOfDoom, JCS, Jan R, Jdiemer, Jodoform, Jpkoeester1, Jtt, Karl-Henner, Karlelch, Kuemmi, LKD, Lanzi, Lille, MBq, Maggot, Marc Gabriel Schmid, Mathias Schindler, Mediciwki, Medwikier, MikeTheGuru, Mikue, Nb, Neokortex, NiTeChiLLer, Night Ink, Nina, Nolispanmo, Numbo3, Oceancetaceen, Olei, Omi's Törtchen, Ot, PaulePanter, Paunaro, Peter200, Quant3-kurzstrumpf, Rainer Bielefeld, Rainer Lippert, Redf0x, Regi51, Reinhard Kraasch, Robodoc, Roo1812, Salmi, Schewek, Scooter, Septembormorgen, Sinn, Sjoehest, Stefan Kühn, Stefan h, Steffen84, Synapse, THWZ, TroX, Tafkas, Thomas7, TobiasKlaus, Tsor, Tönjes, Umweltschützen, Uwe Gille, Verita, WRomey, WikiNick, Wimpus, Wolfgang1018, WortUmBruch, Zaibatsu, 189 anonyme Bearbeitungen

Optik *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83225195> *Bearbeiter:* A.Savin, Acetobacter, Aka, Aki52, Alauda, Allesmüller, Amano1, AndreasPraefcke, Armin P., ArtMechanic, Artur94, Avoided, Azekaze, Baumfreund-FFM, Ben-Oni, Ben-Zin, Bernardissimo, BesondereUmstaende, Bieriimpfl, Binter, Björn Bornhöft, Boemmels, Boonekamp, Bundespatentgericht, Büchervürmlin, C-M, Cdhf, Cepheiden, Chaddy, Chesk, ChrisHamburg, ChristianBier, ChristophDemmer, Church of emacs, Complex, Conversion script, Cornischong, Curtis Newton, D, DasBee, Dassler, Der Wolf im Wald, DerTraeumer, DerHerrMigo, DerHexer, Diba, Diwas, Dmender, Draheg01, Dubman, Dundak, DynaMoToR, Ed.dunkel, El, Emes, Endlos, Engie, ErikDunsing, Euphoriceyes, FischX, Flo 1, Fritz, G Günnie, G-Man, GNosis, Gerbil, Gnu1742, Grottenolm, Gustavf, Head, Heied, Homo Sapiens, Hubertl, Hukukçu, Hydro, Häggis, Inkowik, Iq2010, Ireas, Irmgard, Jaan513, Jesi, Jivee Blau, Jkrieger, JochenK, Jodo, JuergenL, Juesch, Jule, JvE, Kaisersoft, Kako, Karl Bednarik, Kein Einstein, Korinth, Krawi, Kurt Jansson, LArn, LKD, M.Schroeder, Magnummandel, Magnus Manske, MaraBeaNubia, MargitLuise, Martin-vogel, Martin1978, Matt1971, Media lib, Megatherium, NEUOTiker, Nephelin, Nerd, Nicolas G., Nicor, Nocturne, Nolispanmo, Normalo, OecherAlemanne, Otto33, Ottomanisch, PDD, Partaner Time, Patl1993, Pendulin, Peter200, PeterFrankfurt, Philipp Wetzlar, Phrood, Piepmatz, Pik-Asso, Pill, Pittimann, Pjacob, Radio 24, Randolph33, Reinhard Kraasch, Rene.andrae, Rho, Riptor, RobertLechner, Robodoc, Rosa Lux, Rufus46, STBR, San Andreas, ScD, Schewek, Schonrath, Scooter,

Sechmet, Sinn, Smial, Springob, Spuk968, St.s, Staro1, Stechlin, StefanPohl, SteffenB, Sternweh, Synapse, TAXman, TMFS, Teajunky, Tischbeinahe, Tobi B., Tobias Wolter, Tom.koehler, Trg, Trinitrix, Tsor, Tönjes, Ulfbastel, Unyxos, Ventrue, Video2005, W!B.; WAH, WahreJakob, Wiegels, Wolf32at, Youandme, YourEyesOnly, Zaugast, Zenit, 301 anonyme Bearbeitungen

Orange (Farbe) *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=82324419> *Bearbeiter:* AlexanderDreyer, Amtiss, AndreasE, AndreasPraefcke, Askanal, Bakufu44, Baumst, BoP, Boonekamp, Borovino, Calined, Cardiff97, Chrisglub, Christian140, Ckeen, CyborgTosser, Daniel FR, Daniel Markovics, Diba, DiplomBastler, Dogbert66, Dr. Manuel, Draheg01, Earendil, Explosivo, Fxb, GuteMiene, Hardtoexplain, Heinte, Hilfemann, Hoosic06, Hubert, J. 'mach' wustel, Janshi, Johann Jaritz, Jón, Karl-Henner, Kats-rule, Kausel, Kh555, Korny78, Krawi, Leeos, Lustiger seth, Markus Mueller, Martin-vogel, Michael Sander, Mini im Einsatz, Mr.checker, Musik-chris, Neg, Neitram, Oimel, Olaf Studt, Olei, Overdose, Pelz, Peter Putzer, Pjacobi, Preia, Primus von Quack, Rotkaeppchen68, Rudolfox, Schmiddtchen, Soll1, Spam, Stefan h, Suiressn, Tanager16, Tilla, Tischbeinahe, Trickstar, Trickymaster, Wicket, Wiegels, Wipape, Wolfram Alster, XTaran, Yurilein, Zaphiro, Überraschungsbilder, 80 anonyme Bearbeitungen

Photon *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=82995011> *Bearbeiter:* 7Pinguine, A.Savin, ATLANTIS, Aconcagua, Aka, Allen McC., Anhi, Apophis27, Apricum, Ast1ast, Barny22, Ben g, Ben-Oni, Ben-Zin, Boehm, Boemmels, C.Appel, C.Löser, Cepheiden, ChKnoflach, ChristophDemmer, Conversion script, D, DasBee, Der Eberswalder, Der.Traeumer, DerHexer, Dktz, Doc Sleeve, Dodo von den Bergen, Dr. Shaggegan, Ds-Mad-H, Ed dellian, Epix, Epo, Erdhummel, FellPfleger, Fleminra, Frutie, Fubar, Gerd Breitenbach, Gerhardvalentin, Grag, Graphikus, HAL Neuntausend, Heikoschmitz, Heizer, Herbertweidner, Hhoffmann, Hystrix, Iwoelbern, JCS, Jan G, Jeamy, Jesi, Jshimbi, Juesch, Kako, Karlopa, Kein Einstein, Kleiner purzel, Koekdoe, Kubi, Kubrick, Laserator, Laurenz Widahlm, Lefcant, Losso, Luoee, Maradona01, Matgoth, Matthy, Max Plenert, McBayne, Meruah, Morray, Nicolas G., Nobbiää, Norbert Dragon, Numbo3, Paddy, Peacemaker, Padiadeep, Perk, PeterFrankfurt, Pewa, Philipendula, Pjacobi, Pronkow, Rainald62, Rainer Nase, Raphael Frey, Regi51, Renito, Schewek, Schiefesfragezeichen, Schulzjo, Schusch, Servalexer, Sinn, Spawn Avatar, Spincoater, Sbrauer, Stefan, Stefanwege, SteffenB, Stern, TDF, Trickstar, Udm, Ulm, Vulture, Wiki-observer, Wipape, Wrongfilter, Xaggi, Xvlnun, YourEyesOnly, Zipferlak, Zwikki, 163 anonyme Bearbeitungen

Photopisches Sehen *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=81066413> *Bearbeiter:* Aka, Anastasius zwerg, Arno Matthias, Bingbaum, Gerd Taddicken, Hans-Werner34, Head, Inkowik, Korinth, Pik-Asso, RokerHRO, Sicherlich, Tobias Wolter, W!B.; 2P, 7 anonyme Bearbeitungen

Physik *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=82352602> *Bearbeiter:* 1971markus, 24-online, A.Savin, Abubiju, Ach, Aconcagua, Ademant, Aetas volat., Aglarech, Aineias, Aka, Albe, Aleks-ger, AllesMeins, AlterVista, Althaia, Amphibium, Amtiss, Andyc, Aokavak, Aquis, ArtMechanic, Axl Rose, BK-Master, Baba66, Balü, Barbarossa, Baumfreund-FFM, Bdk, Belsazar, Ben-Oni, Ben-Zin, Benjamin.Kaufmann, Benny225, Berni, Bildungsbürger, Björn Bornhöft, Bluemask, Boehm, Boemmels, Borislav, Brackenheim, Brandti, BrotherM, C-M, CaSe, Calesty, Camenzind Martin, Capaci34, Cavendish, Ce, Ce2, Centic, Chb, Chef, Chewey, Cholo Aleman, ChristianBier, ChristophDemmer, Cigno, Clemfix, Cliffhanger, Commander-pirx, Complex, Conversion script, Cuchullain, D, D-kw, Dachris, Daniel FR, Das Kollektiv, Dcoetzee, Dealersofsalvation, Der.Traeumer, DerHerrMigo, DerHexer, DerSchim, Derkommissar, Dersven, Diba, Diddi, Dingo, Dishayloo, Doc Sleeve, Docmo, Dominik, Don Magnifico, Dundak, Dwi Secundus, Edelweiss2, Edoe, Ehaas, Ekab, El, Elian, Emergenz, Emes, Eneas, Engie, Ephraim33, Epix, ErikDunsing, Fagato, Felix Stember, Fgb, Filzstift, Florian, Floriang, Frank Schulenburg, Frank Siebert, Franz1 92, Frau Holle, Fritz400, Fuenfundachtzig, Fullhouse, Funky 1993, Galameli, Gamma, Geof, George Stobbert, Gerbil, Gerhardvalentin, Gerlach, Gilliamjff, GluonBall, Gnu1742, Grand-Duc, Gum'Mib'Aer, Gurt, H2g, H2owasser, HaSee, Hadhuey, HaeB, Hagbard, Hardenacke, Harro von Wuff, HaseOlaf, HaukeZuehl, He3nry, Hei ber, Henning Ihmels, Hermannthomas, Herzi Pinki, Hijackal, Hipi Zhdripi, Hokanomono, Hwielh, Hydro, Häeggis, I-veress, Ice Fox, Imperator, Inkowik, Ion, Irmgard, Itu, Ixitxel, JXN, Jackalope, JakobVoss, Jarlhelm, Jed, Jens Prüfer, Jergen, Jivee Blau, Jkbw, Jodo, Joeb07, Jonathan Groß, Jonathan Hornung, Jpp, Jschroeck, Juesch, Jürgen Schmidtke, KaiMartin, Kaisersoft, Kalli R, Karl-Henner, Katharina, Kibert, Kilian Klaiber, Koethnig, Kubrick, Kuemmi, Kuhlo, Kurt Jansson, LKD, Leonhard Ochs, Lepton, Leserate, Lotse, Lukian, Lummer, Lycidas, MAK, MBQ, Magnummandel, Mamue81, Marc van Woerkom, Marcoscramer, Marilyn.hanson, MarkusRedeker, Martin Schaefer, Martin-vogel, Mathaxiom, Matze6587, Mawa, Max Plenert, Maxmax, Media lib, Mendax, Mh26, Mike Bernhardt, Mikue, Millbart, Mnh, Morruk, Mreis, Musikhörer, Möchtegern, Nachtagent, Nerd, Nicolas, Nicolas G., Nicor, Niklas s, Nirakka, Nocturne, Norbert Dragon, Norro, Nwabueze, Oberbefehlshaber, Odin, Ollio, Ot, Ozuma, PM3, Patryn, Pendulin, Perrak, Peter200, Phr, Phrontis, Physikgenie, Piepmatz, Piffpoffer, Pinpointer, Pittmann, Poupée de chaussette, Proxima, Quirin, Raffix, Rdb, RedZiz, Regi51, Rho, Ri st, RokerHRO, Rudolph H, S.Didam, STBR, Sadir Babajew, Saemon, Sambur, Sansculotte, Sarah@I, Saure, ScD, Schewek, Schlauer03, Schlesinger, Schulzjo, Schwalbe, Schweikhardt, Sechmet, Seewolf, Segelmaus, Shesterov, Shipbuilder, Silberchen, Simeon, Sindopower, Sinn, Sky-Jena, Small Axe, Soutlcer, Southpark, Spuk968, Spundun, SteMicha, Steevie, Stefan Kühn, Stefan Majewsky, Stefan h, Stefanwege, SteffenB, StollenTroll, Summ, SuperFLoh, Superbass, SvenP, Sypholux, T.a.k., TDF, Tanks, Tempo plus, Theobx3, Thkoch2001, Thomasx1, Thorbojern, Thunfischpizza, Tian, Till.niermann, Tinti, Tinz, Tom Bouctou, Tom.b, Traitor, Traroth, Traute Meyer, Tritonus05, Trugbild, Twinbe, Tönjes, Unsterblicher, Uwe Obst, VM123, WAH, Wealawaga, Weiichei01, Werner Maurer, WiESi, Wicket, Wickle, Wiki Gh!, WikiProf, Wikitom, Wikipedia-help, Willimczik, Wipape, Wkrautter, Wolf32at, Wolfgang1018, Wolfgang40627, Wolfgangbeyer, Xjs, Xcolatl, Xorx, Yahp, YourEyesOnly, Zbisasimone, Zeno Gantner, Zenon, Zivilverteidigung, Zizeye, p3EE045B5.dip.t-dialin.net, 576 anonyme Bearbeitungen

Pigment *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83865773> *Bearbeiter:* Aka, AndrewPoison, Antonia2506, Armin P., ArtMechanic, Ata, Auto, BLueFiSH.as, Bdk, Bernard Ladenthin, Blaufisch, Blippo, Boonekamp, Carol.Christiansen, Ceresana, Chemiewikibm, ChristianSW, Cjesch, Ckeen, DTeetz, Dagdor, Daidalus, DerHexer, Detlef thomas, Diba, DiplomBastler, Driwas, Dogbert66, Dr.cuepers, E-prinz, Einsamer Schütze, Engeser, Euphoriceyes, EvaK, FK1954, Fedi, Fixlink, Flibbertigibbet, Florian Adler, Focus mankind, GT, Gary Dee, Gnu1742, Grey Geezer, Grotenolm, Haiantquang, Hardcoreraveman, HarryDo, Heinte, Hibodikux, Howwi, Hystrix, Ich liebe ELKE, Ivo meier, Jo Weber, JosefLehmkuhl, Juesch, Kaisersoft, Kalli R, Karl-Henner, Kausel, Kixx, Kku, Knocker, Kremer Pigmente, Kuebi, Lehmkuhl-josef, Lunus, Lyzzzy, M.Ebner, Mabschaaf, Mikue, Mkill, Mnh, Mr.crispy, NEUROtiker, Nanotrix, Naphtha, Nephelin, Nice jellyfish, Nicolas G., Nicor, Nikkis, Obersachse, Orci, Ot, Pelz, Philipendula, Pittmann, Rdb, Reinard, Rjh, Roland.chem, Rolf Schulte, Rosa Lux, Rotkaeppchen68, Saehriminr, Schwalbe, Sigune, Silenus, Sonic2x, Sponk, Steschke, Succu, Swartena, Swing, Thomas, Thorbojern, Tom md, Toter Alter Mann, Trudylian, Ty von Sevelingen, Törtchen, VerwaisterArtikel, Video2005, Vietinghoff, W!B.; WAH, WS62, Wiegels, Wiki-observer, Wächter, YourEyesOnly, Zahnstein, 123 anonyme Bearbeitungen

Polarisation *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83587275> *Bearbeiter:* 790, A.Savin, Ahellwig, Aka, Alfe, Amtiss, Anaximander, Andreas -horn- Hornig, Anony, ArtMechanic, Averse, BastiS, Benedict Dudda, Between the lines, Boemmels, Brackenheim, Bugert, Callidior, Cepheiden, Ch1m41r4, Charly Whisky, Christianh, ChristophDemmer, Claude J, Complex, Crux, Cweiske, DMKE, Del45, DerSchmunzelhase, Dogbert66, Doit, EbbeSand, El, Entlinkt, Ephraim33, Fkoch, FlorianSimon, Formative, Froggy, Georg-Johann, Gerd Breitenbach, Gerhardvalentin, Gurgelgonzo, Herbertweidner, Hgrobe, Hofres, Hokanomono, Howwi, Hwunsch, Jah, Jergen, Jivee Blau, JuTa, Kaffianer, KaiMartin, Kein Einstein, Klumpp, Kricki, LivingShadow, Longone, M.hoefling, M0nsterxxl, Magnummandel, Martin-vogel, Mfb, Mino, Minotauros, Momotaro, Morioli, Mreis, Nachtigall, Nephelin, Nolispanmo, Ot, Paddy, PaterMcFly, Peter200, PeterFrankfurt, Pfalzfrank, Philipp W., Pi, Proxima, Rainald62, Reinhard Kraasch, Reizraum, Rhi, Rivi, RoB, Robert Weemeyer, Rolf Maria Rexhausen, SHZ.de, Saehriminr, Satmap, Schulzjo, Sec, Solid State, Southpark, Spektrum, Staro1, Stefan Kühn, Thogo, Till.niermann, TzCalle, Tönjes, Ulfbastel, Uwe W., Vertigo21, WAH, Waugsberg, Weggeman, Wfstb, Wolfgang.geithner, Zwikki, 145 anonyme Bearbeitungen

Prisma (Optik) *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83559011> *Bearbeiter:* 1971markus, Aconcagua, Aka, Analemma, Avoided, Baisemain, Blaubahn, Blauer elephant, Boehm, Boonekamp, Cepheiden, Claudioverfuhrth, Cosine, D-Kuru, Degreen, Der Wolf im Wald, El., Elwe, ErikDunsing, ErnstA, Exil, Fized, FlorianWeingarten, FreakingOut, Fred555, Geomeyda, He3nry, Heinz-ber, Homo Sapient, InkiOfDoom, JLeng, JakobVoss, Jergen, Josef Meixner, Jxr, Krawi, LivingShadow, Magnus, Marc Gabriel Schmedl, Marc Tobias Wenzel, Michail, Nicolas G., Olei, Peter200, Pittmann, PrismaNN, Proxima, Ratschin, RichiH, Rr2000, Saperaud, Sesc, Sinn, Spuk968, StefanPohl, Tafkas, Timk70, Tom.koehler, Trinitrix, Verweyen, W!B.; Wolfgang1018, YourEyesOnly, 95 anonyme Bearbeitungen

Reflexion (Physik) *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84195909> *Bearbeiter:* (127.0.0.1), 08-15, Afrosidiac, Ahellwig, Aiko 1994, Ak kA, Aka, Akustik, Aleks-ger, Alexander.stohr, Arctanx, ArtMechanic, Avoided, BLueFiSH.as, Bas89, Baumfreund-FFM, Ben-Oni, Ben-Zin, Blauer elephant, Boehm, Boonekamp, BurghardRichter, Cepheiden, Charlottenburger wertber, Chesck, Chris Howard, ChrisHamburg, Cmoder, Complex, Curtis Newton, D, DJS, Dachris, Dantor, DasBee, Degreen, Der.Traeumer, DerHexer, Diba, Dickbauch, Dirk Beyer, Dk9sj, Don Martin, Duesentrieb, Dundak, Ebs, Entlinkt, Entlinkt muss fort!, Ephraim33, Fized, Franzl aus tirol, Ghinrael, Gluon, Gonzosft, Hardenacke, He3nry, Heitron, Henning2202, Herbertweidner, Himuralbima, Hjaekel, Hoo man, Howwi, Ireas, Jdiemer, Jivee Blau, Johanna R., Jonathan Hornung, Jrobert, Kaisersoft, Kako, Kammerjaeger, Karl-Henner, Katharina, Kuifje, LKD, LS245, Lermnon, LittleJoe, LivingShadow, Louis Bafrance, Lustiger seth, MaSt, Macks, Magnummandel, MarcelSteinert, Masc88, Matt1971, McB, Mendax, Mnh, MsChaos, Mschindwein, NPunkt, Nachtagent, Nephelin, Nize, Nolispanmo, Odin, Olei, Ot, Oxyoron83, PDCA, Parasit, PaterMcFly, Peng, Peter200, PeterFrankfurt, Pik-Asso, Pittmann, Potthässlich, Proxima, Rainald62, RealZeratul, Regi51, Robert Weemeyer, Rosa Lux, Saperaud, Schmendrik881, Schnull00, Schrauber5, Schwalbe, Seb.froh, Sechmet, Siehe-auch-Löschler, Sinn, Sir Boris, Skyhead, Small Axe, Smial, Sobreira, Spuk968, STYXxx, Stefan Kühn, Succu, T.hellwig, Tauro8000, Tetsuo Shima, ThomasPusch, To old, Toomstar, Trewq, Turdus, Tönjes, Ulfbastel, Ulrich.fuchs, Ulz, WAH, William Wallace, Wing, Wolf32at, Xorx, Xqt, YourEyesOnly, Zenit, 245 anonyme Bearbeitungen

Regenbogen *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84191626> *Bearbeiter:* 790, A.Savin, Aka, Alex1011, Alexander.stohr, Alfie66, Allen McC., AlterVista, Amb, Amtiss, Analemma, AndreasPraefcke, Andybopp, Andys, Ar-ras, ArtMechanic, Asdrubal, Avoided, Baird's Tapir, Bautsch, Bdk, Ben Ben, Ben-Zin, Bernard Ladenthin, Bier Beck's Move, Big.N, Bildungsbürger, Bishkek-Rocks, Blablappa, Blah, Blaufisch, Blutwoosch, Blueser, Boonekamp, Brummfuss, Bsmuc64, Capaci34, Carol.Christiansen, Cepheiden, Chriskan, Christian Gawron, ChristianSchulz, Ckeen, Claude J, Code, CommonsDelinker, Complex, Crux, Cymothoa exigua, D, DCMA, DLicht, Daniel73480, Dennisgamer, Der.Traeumer, DerHexer, Diba, Diebu, Dittmar-Igen, Duesentrieb, Dulciamus, Dullnraamer, Dundak, Eckhart Triebel, Eike sauer, Ekling, Engie, Ephraim33, Euphoriceyes, EvaK, Eynre, Fasten, Feba, Flominator, Florian Adler, Frack000, Fransvannes, FriedemannZ, Fristu, Ftschoenn, Fuenfundachtzig, GNosis, Garnichtsoefnach, Gause, Geist, der stets verneint, Geof, GeorgGerber, Gerold Broser, Gertner, Gilliamjff, Goesseln, Gries, Grzegorz Wysocki, Guanaco, Gubacina, Halazon, Hans Koberger, Harro von Wuff, Haruspex, He3nry, Head, Helmutvan, Hendric Statmann, Henriette Fiebig, Herbert Lehner, Hessenfisch, Hgulf, Hk-Lo, Hokuzai, Howwi, Hydro, Ikar.us, Invisigoth67, Iotatua, Jed, Jivee Blau, Jmsanta, Joeopitz, Johamar, JohannWalter, Johnny Controlteili, Jondor, Kagrenac, Kai11, Kaisersoft, Karl-Henner, Kibert, Kickoff, Kookakbar, Krawi, Kreuzschnabel, Kuebi, Kwer Wolf, König Alfons der Viertelvorzwölfte, LKD, LLakritz, Labus, Lektor, Liberatus, Linksfluss, Lofor, Logograph, LonelyPixel, Lüg net, MadDog, Magnus Manske, Magnus Nufer, Mamue81, Manfred Heyde, MarkusHagenlocher, Martin-vogel, Maschinenkanone, Mats Halldin, Matt1971, Matthy, Matzemati, Mbz1, Membeth, MichaelIFrey, Michail, Mnh, Mo4jolo, Moguntiner, Muck311, Nagy+, Neitram, Nepenthes, Nephelin, Nicolas G., Nikkis, NormalNull, Oberfoerster, OdysseuS, Olei, OliT., Orci, Ot, Papiermond, ParaDox, PaulBommel, PaulT, Pendulin, Peter200, PHJ, Björn Bornhöft, Pika-Asso, Pischdi, Pittmann, ProfessorX, Pöt, RainbowA, Ralf Gartner, Ralferry, Raschneider,

Raymond, Regi51, Reinhard Kraasch, Rgelpke, Roo1812, Rubblesby, Rufus46, S.Didam, Saperaud, Schewek, Schlurcher, Schmelzle, Schnargel, Schuetzm, Scooter, Seewolf, Siebzehnwolkenfrei, Siehe-auch-Löschler, Sinn, Southpark, Spooky vision, Spuk968, St-SaHiB, Steevie, Stefan, Steffen, Subn, Sundance Raphael, Talaris, Tastler, TheK, Thogo, Thomas Netsch, Thorjoern, Til Lydis, Tob1 B., Tönnies, Umweltschützen, Unsterblicher, Vasif, Vesta, Voyager, Vulkan, W-j-s, W.bars, WAH, Wahrerwattwurm, Wahrheitsministerium, Wiki-piet, WikiReviewer.de, Wolf170278, Wolfgangbeyer, Wolke, Xjs, Xocolatl, Yesuitus2001, YourEyesOnly, Zahnstein, Zenit, Zico, זכר סגור ירי, €pa, 413 anonyme Bearbeitungen

Remission (Physik) *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=67639178 *Bearbeiter:* ArtMechanic, Ben-Oni, BesondereUmstaende, Biologos, Cepheiden, ChristophDemmer, Claude J, Duesentrieb, Firsthuman, Kein Einstein, Laserdiode71, Nephelin, Raymond, RobertMichel, Rosa Lux, Stefan Kühn, Ulrich.fuchs, W!B:, WortUmBruch, 6 anonyme Bearbeitungen

RGB-Farbraum *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84017989 *Bearbeiter:* 32X, 790, Aka, Akribix, Al'be:do, AlterVista, AndreasB, Andy king50, Andys, Aseptor, Avoided, BlueFiSH.as, Bahnmann, Bassoonist, Ben g, Benji, BesondereUmstaende, Boehm, Boonekamp, BrilleUndBart, CK85, Ce2, Cepheiden, ChrisHamburg, ChristianErtl, Ckeen, Claudia1220, Cnagl, Complex, Crux, DerHexer, Dickbauch, Die zuckerschnute, Diesterne, DiplomBastler, DrSeehas, Dubu, Elasto, ErikDunsing, FUZxxl, Fedi, Felix Stember, Filmtechniker, Fomafix, Fredo 93, Friedrich Graf, GNosis, Geekux, Guandalug, Guffi, Hafenbar, Hagman, Hannes Röst, He3nry, Head, Horst Frank, Hydro, InikOfDoom, JAF, Jadadoo, JakobVoss, Jergen, Jhartmann, Jivee Blau, Johannes re, Jojomidi, Josef.schneider, Jpp, JuTa, Kam Solusar, Karl-Henner, Kh555, Kingofears, Kku, Koala, Krd, Kubrick, Kungfuman, Lax, LivingShadow, Louis88, Magnummandel, Marti7D3, Martin Braun, Martin-vogel, MartinWoelker, MasterFaS, Mike Krüger, Minderbinder, Morgenstund, Muddl1, Neg, Nephiliskos, Nicolas G., Nirakka, Nyks, Ot, Oxyoron83, Pawla, Peter17, Phrood, Piteo, Quistnix, RHE1979, Rainer Nase, Regi51, Rufus46, Schubbay, Sebastian Flothow, SibFreak, Sikilai, Sinn, Sitacuisse, Sloyment, Sommerkom, Spuk968, Stefan, Stefan Kühn, Stefan h, Stf, Suit, Tailo, TheGeneral, Thornard, TiHa, Tim Pritlove, Tjb, U86774, Umaluagr, UntilWhen, Uwe W., Vinci, W!B:, WiESi, WikiPimpi, WortUmBruch, Zacken200, 319 anonyme Bearbeitungen

Rot *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83317846 *Bearbeiter:* A.Savin, ASK, Aaaah, Ahellwig, Aka, Alex1011, Alkab, AndreasPraefcke, Andys, Attila v. Wurzbach, Aule, Avoided, BS Thurner Hof, Baumst, Bender235, Bernd in Japan, BerndGehrmann, BoP, Boonekamp, Calined, Carski, ChrisHamburg, Christoph Radtke, ChristophDemmer, Chrysemys, Clemensfranz, Complex, CruZer, Crux, Daniel 1992, Daniel FR, Das .:X, DasBee, DerHexer, Diba, Diefarbeblau, DiplomBastler, Dogbert66, Dr. Meierhofer, Drahreg01, Dreadn, Désirée2, Elchjagd, Elektronenhirn, Engie, Enslin, Eruantalon, Euku, EvaK, Feccchi, FvG, Gnu1742, Grüner Stern, Hans J. Castorp, He3nry, Head, Hedwig Storch, Henriette Fiebig, Here4u, Holder, Hoosic06, Howwi, Immanuel Giel, Inkowik, Iro-Iro, Jan Mathys, Janine21, Johnny Yen, Juesch, Jumbo1435, Jürgen Schmidtk, KGF, Kai das Eiiiiiiiiiiii, Kam Solusar, Karl-Henner, Kausel, Kh555, King Euro, Kladson, Knoerz, Kkua, Krawi, Lderendi, LebhafterLebkuchen, Leipnizkeks, Libelle63, Magnus, Manjel, Markus Mueller, Martin Bahmann, Martin-vogel, Mekwaldhauser, Melk, MichiK, Miglincit, Milgesch, Millbart, Mnoif, Monarch, NiTenchiRyu, Nikkis, Nolispanmo, Norbirt, Parakletes, Peter adamicka, Peter200, PhJ, Phrood, Pilzi, Pittimann, Pjacobi, Pokefan212, Pyrenaen, RabbitsDad, Rauenstein, Regi51, Rotkaeppchen68, Rufus46, STBR, Sabine0111, Saehrimnir, Sansculotte, Sascha Claus, Scooter, Seewolf, Sinn, Sisal13, Small Axe, Spuk968, Star Flyer, Staro1, Stefan h, Stern, SteveK, Taxiarchos228, Tilla, Tillmann Walther, Toebbens, Tbya, Tönjes, Ulli Purwin, W!B:, WAH, Werber, Wetterwolke, Wiegels, Wiki-Hypo, Wissens-helfer, Xqt, YMS, YourEyesOnly, Ysae, Zaibatsu, Zaphiro, Zapyon, Zeuke, Zollernalb, -0-8-15!, Überraschungsbilder, 193 anonyme Bearbeitungen

Schwarz *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84121901 *Bearbeiter:* A.Savin, Acf, Achates, Aka, Akkarin, Armin P., Asdrubal, Attila v. Wurzbach, Bakufu44, Balû, Bertonymus, Blaue Orchidee, Boggie, Boonekamp, Borovino, Büchewürmlein, CRuiSeR, Calined, Captain Crunch, Cecil, Cjesch, Complex, Conny, Crucecone, D, Daniel FR, DanielDüsentrieb, DasBee, DerHexer, Diba, DocMario, Dogbert66, Dr. Meierhofer, El surya, Emkaer, Enzyklofant, Equinox.death, Franz Xaver, Fuenfundachtzig, Geist, der stets verneint, Grey Geezer, Hans-Peter Scholz, Head, Heimli1978, Holger Gruber, Hoosic06, Hubertl, Immanuel Giel, Inkowik, Janine21, Jesi, Jivee Blau, Jla net.de, Jodo, Jonathan Groß, JuTa, Jürgen Schmidtk, Karl-Henner, Katharina, Kats-rule, Kausel, Kielradio, Kitt1996, Kku, Kladson, KlausLandwirt, Koala, Krawi, LKD, Leipnizkeks, Like a flood, Lode, Lst.000, Lugel, Lukas (Admin), M 93, M.L., Mangomix, Markus Mueller, Markus Schweiß, Martin-vogel, Martin1978, Mathias Schindler, Matt1971, Memmon, Memorino, MichiK, Mikue, Mo4jolo, Moud, Nerd, Nergal, Nicolas G., Nicolas17, Nockel12, OgeRetla, Olei, Overdose, Oxyoron83, Palandur, Pelz, Peter200, PhJ, Pitlane02, Pronegro, PsY.cHo, Rasko, Rauenstein, Regi51, Ribo, Richardigel, Roo1812, STBR, Sbeyer, Schmidttchen, Schnargel, Schwarz2008, Seb1982, Sinn, Solid State, Sommerkom, Spuk968, Steevie, The pyr o man, Tob1 B., Tobnu, Triebtäter, Tsor, Tönjes, Ulli Purwin, Unsterblicher, Vasif, Vodimivado, WAH, Wiegels, Wolfskindt, Wst, YourEyesOnly, Zaphiro, Zerebrum, Zeuke, €pa, 201 anonyme Bearbeitungen

Sonnenstrahlung *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84061900 *Bearbeiter:* Abderitestas, Andreas 06, Anneke Wolf, Belgariath, Berklas, BeziehungsWeise, Björn Bornhöft, Boonekamp, Böhringer, Capaci34, Carstor, Chemiewikibm, Christian1985, ChristophDemmer, Clemfix, Complex, Crux, Dantor, DasBee, Degreen, Der.Traeumer, DerHexer, Don Magnifico, Engie, Felix Stember, Fidorra, Florian Adler, Frankee 67, Geof, Georg-Johann, Glenn, Graviphotohon, Hafenbar, He3nry, Hi-Lo, Howwi, Hubertl, Hydro, I-user, Invisigoth67, Iru, Jens Liebenau, Jivee Blau, JohannWalter, KaiMartin, Kakoui, Kaugummimann, Kein Einstein, Koerpertraining, Krawi, Kronf, Mac ON, Manecke, Maqquz, Matthias M., Mfb, Millbart, Mnh, MobyDick, Neitram, Nolispanmo, Onee, Paddy, Peter200, Phrood, Pittimann, Pohli, Politics, Quelix, Rainald62, Rbrausse, Redlinux, Regi51, Rfc, Rosa Lux, SF Wissen, Saethwr, Saperaud, Schusch, Seewolf, Sergejzr, Silenzium, Spuk968, Thomas118, Thorjoern, TomAlt, Tubas, Umweltschützen, Vodimivado, WIKImaniac, Westiandi, Wolke, Wst, Xocolatl, 89 anonyme Bearbeitungen

Spektralfarbe *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83641099 *Bearbeiter:* Ahellwig, Aka, Al'be:do, Andrika, Andys, Armin P., Avoided, BJ Axel, Backlit, Baxerus, Ben-Zin, Boemels, Boonekamp, Böhringer, Ce, Ce2, ChristophDemmer, Church of emacs, Conversion script, Curtis Newton, DasBee, Diba, Dogbert66, DrunkenBond, Frank-m, HaSee, HaeB, Herbertweidner, High Contrast, Inkowik, Karl Bednarik, Korinth, Magnus Manske, Markus Mueller, Martin Bahmann, Matthias M., Moguntiner, Morten Haan, Nikkis, Odin, Pallasathena, Peter200, Pittimann, Plehn, PrismaNN, Proxima, Rawuza, Regi51, Reinhard Kraasch, Rufus46, STBR, Saperaud, Schewek, Schmidttchen, Solid State, Spawn Avatar, Spuk968, Stefan h, Tafkas, Telrúnya, Umweltschützen, W!B:, WAH, Wahldresner, Wächter, 81 anonyme Bearbeitungen

Spektralklasse *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84209340 *Bearbeiter:* 1234567891011a, 217 .125 .121 .169, Aka, Allen McC., Ambrosius, Antonsusi, ArtMechanic, Batrox, Bent, Biedimpfl, Binter, Blaufisch, Breeze, Cecil, ChristophDemmer, Cäsium137, Dejus, Density, Don Magnifico, Duesentrieb, Entinkt, Farin12, FerdiBf, FrancescoA, HaSee, HenrikHolke, IWorld, JFKCom, Jpp, Kaleko, Kibert, Konrad F., Marc Layer, Martin-vogel, MoreInput, Morten Haan, Omnidom 999, Orci, Peter200, Pittimann, Puma 2010, Raumfahrtgenieur, Reinhard Kraasch, Rivi, RokerHRO, STBR, Saperaud, SiriusB, Spektrum, Spuk968, Ust, Wcp79, Wrongfilter, YourEyesOnly, 76 anonyme Bearbeitungen

Stäbchen (Auge) *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84207266 *Bearbeiter:* Aka, Anhi, Arno Matthias, Björn Bornhöft, Buffy, C.pu, Cbraun75, Cholo Aleman, Christian2003, Cvf-p, D, Daniel 1992, Daniel FR, Doudo, Drahreg01, Dunkeltron, Gerbil, Gunnar Eberlein, Herbertweidner, Hermannthomas, Hydro, Jan R, Jivee Blau, Jpkoeater1, KOchstudiO, KaiMeier, LKD, Louisa, Lämpel, Merlin G., Mfb, Mohamedali, MrStahl89, Night Ink, Nikkis, Novox, Ot, Peterlustig, Psychologiestudent, Regi51, Reinhard Kraasch, Spuk968, Synapse, Umweltschützen, WAH, WolfgangRieger, YMS, YourEyesOnly, 46 anonyme Bearbeitungen

Substraktive Farbmischung *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=82582281 *Bearbeiter:* Ahoerstemeier, Analemma, Andrika, Andys, Asb, Asthma, Ax, BerndGehrmann, Boonekamp, Centic, Cfaerber, Cologinux, Complex, Darkone, Dr.Traeumer, DerHexer, DiplomBastler, Dogbert66, Duesentrieb, Dulciamus, Flominator, Fontipe, Friedrich Graf, Guandalug, Hardcoreraveman, Hardenacke, HarryDo, Ich.binn:dagegen, Inkowik, Jmsanta, Kh80, Kibert, Knoerz, Koala, Laufe42, Little jo, LoKiLeCh, MarcoGeisler, Mazbin, Michail der Trunkene, Nephelin, Newone, Nikater, Odin, Oliver Runge, Paramecium, Pere Ubu, Qhx, Quistnix, Raymond, Roo1812, Rosa Lux, Rotkaeppchen68, Seb1982, Sefo, Shoshone, Sozi, Spinnerin, Srvban, TMg, TRoX, Taratonga, TiHa, Timk70, Tinz, Trustable, W!B:, WAH, Xeo, 87 anonyme Bearbeitungen

Ultraviolettstrahlung *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84240011 *Bearbeiter:* AVe, Aka, Akkakk, Akriesch, Aleks-ger, Andante, Andi K, Fellner, Andre Engels, Andreas 06, Andreas Groß, Andy king50, Andyg, Ansen, Apolloniusrhodos, Avoided, BJ Axel, Bahnpirar, Baronvans, Beaker2, Beelzebubs Grandson, Ben-Zin, Benreis, Biagiotti, Biedimpfl, Bingbaum, Blacksun, Blauer elephant, BoP, Boehm, Brackenheim, Brummfuss, Bundesstefan, Butcherbird, Büchewürmlein, CaZeRillo, Candid Dauth, CannabisEnte, Cepheiden, ChristophDemmer, Cirdan, Cleverboy, Collix, Commander-pirx, Complex, Corrigo, Crux, DWay, Daffman, Dalmas, Daniel Mex, Dansker, Diba, Dickbauch, Dispersion, Don Magnifico, Dr.Gordon, Drahreg01, Dundak, Dysmachus, EFire, Einmaliger, Eloquent, Euku, Euphoriceyes, Fairplay, Felistoria, Firefox13, Florian Adler, FlorianWeingarten, Frquadrat, Gdarin, Georg-Johann, Gerhard Elser, Gerhard.morgenbesser, Germit, Gerriet5, Gleiberg, Guandalug, Hadhuey, HaeB, Hannover74, Henrietta R Hippo, Herbertweidner, Hermannthomas, Hewa, History, HorstTitus, Huberdaniel, Hydro, IOOI, Inkowik, Isheden, JCS, Jaellee, Janstr, Jed, Jekub, Jens Lallensack, Jkbw, JuTa, Kibert, Kku, Kluiibi, Knoppen, Koala, Kronf, Kuebi, Leyo, Lichtenstein, MPruha, Magnummandel, Markbenecke, Markus Hagen, Markus Schweiß, Martin-vogel, Matt1971, MatthiasRauer, Max Plenert, Mini im Einsatz, Mnh, Momomu, Morruck, Mouagip, Muck31, Mydalon, Möchtegern, Neitram, Neukom Pascal, Nirakka, Njirks, Onee, Onkel74, Orci, Ot, Paddy, Papilio, PassePorte, Pharaoh an, Phi, Pjacobi, Proxima, Purodha, Qniemiec, Quark48, Quickfix, RWalle, Rainer Bielefeld, Regi51, Rhododendronbusch, Rieschl, Roo1812, Rosa Lux, Saehrimnir, Schewek, Schlesinger, Schnatterfleck, Schnuffi72, Sinn, Skreussel2, Spawn Avatar, Spießensder, Srbauer, St-sax, StG1990, StefanG4, Succu, Suit, Sunfrog1, Syrcro, Thogo, Thomas118, Thorjoern, Thukydidies, Tilde, Tillniermann, Tim.landscheidt, Tjb, Tob1WanKenobi, Tobias Bergemann, Tommy111, Tower of Orthanc, Tschäfer, Tönjes, UV-Lampen, Ulfbastel, Umweltschützen, Uwe Gille, Uwe Lück, Varulv, Verita, Voland, WAH, WOBEB333, Wdwd, Wettig, WikiJourney, Wirthi, Wolfgang1018, Wsanter, Xeph, YMS, Yellowssunshine, YourEyesOnly, Zaibatsu, Zaphiro, 306 anonyme Bearbeitungen

Vierfarbdruck *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=72000536 *Bearbeiter:* Ahellwig, Aka, Alkuin, Boonekamp, Bur, ChristophDemmer, Connum, Danieltgross, DerHexer, Dieselross, Fedi, Germania, Halbarath, Hhdw, Hubertl, Hutschi, Hyperdieter, JamesCook22, Krawi, Leyo, Nikater, Nigardo, Obersachse, Ot, Peter200, Pott-sau, Raboe001, Sargoth, Sozi, TiHa, TomCatX, 42 anonyme Bearbeitungen

Violett *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83329429 *Bearbeiter:* A.Savin, Aka, Alex1011, Ar-ras, Armin P., Avoided, BKSlink, Bender235, Benzen, Biedimpfl, BlueCücü, BoP, Boonekamp, Bsmuc64, Calined, Christianh, Cproesser, Cvk, Daniel FR, Diba, DiplomBastler, DocMario, Dodo von den Bergen, Dogbert66, Engie, Euphoriceyes, Fg68at, Gamma9, Gordon780, Grey Geezer, Grindinger, Guidod, GunterS, Hötte, Hedwig Storch, Hypocritical, Ibn Battuta, JuTa, Kats-rule, Kausel, Klever, Koala, Listener, Magnummandel, Markus Mueller, Martiny, Matt1971, McAlexander, McSquirrel, Michael Hardy, Mipago, Mounir, Mucros, Neu1, Noebse, Nofsi, Oderik, OecherAlemanne, PDD, Paramecium, PeerBr, Phantom, Pittimann, Pjacobi, Regi51, Resmomo, RokerHRO, Roo1812, Sloyment, Steef, The Evil IP address, TheK, Tob1 B., Urizen, WAH, Walter Falter, Wasserkeks, Weiche Linke, Wiegels, Wolfgang1018, Wst, YourEyesOnly, Zaibatsu, Zggl, Überraschungsbilder, Скоморохадан, 111 anonyme Bearbeitungen

Visuelle Wahrnehmung *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=83835559> *Bearbeiter:* Aka, Alexander Maier, Anaxo, Andante, Anhi, Arno Matthias, Asb, Atompilz, Avoided, BLueFiSH.as, Big.N, Blaufisch, Blootwoosch, Broli, C.pu, Chaddy, Chin tin tin, Chrislb, ChristophDemmer, Compadrito, Crux, Cspan64, Der Lange, DerHexer, Diba, DiplomBastler, Dundak, ErikDunsing, Euku, Farino, Filzpantoffel, Flo 1, Froggy, Gerbil, Hans-Werner34, Hasso L, Hei ber, Herbertweidner, Herr-Schlauschlau, Holman, Hutschi, J-J-Rousseau, JCS, JHeuser, Jergen, Jkbw, Juliana, Kastenwirbel, Kerbel, Kersti Nebelsiek, Kily54, Kku, Knarf-bz, Kursch, LKD, Leon, Lueggu, M-J, Manoridius, Martin Bahmann, MartinThoma, Matt1971, MiBü, Mike Krüger, Morten Haan, Nachtagent, Nicolas G., Nikkis, Nina, Paddy, Peter200, Pik-Asso, Pittimann, QualiStattQuanti, Quarte, RitaC, Rufus46, Ruru, SchnappeCo, Schoggigipfel, Seewolf, Siebenundzwanzig, Simulo, Sinn, Snoop, Steevie, Steffen, StephanPsy, Stern, Sti, Sypholux, TableSitter, Thetawave, ThomasPusch, Tomaschowski, Transportme, Uwe Gille, Viericks, WAH, Warentester, Wasseralm, Wilske, Wkrautter, Wookie, XShake, Zaphiro, °, 115 anonyme Bearbeitungen

Weiß *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=84176106> *Bearbeiter:* 4tilden, A.Savin, ALE!, Abu el mot, Aka, Alkibiades, AndreasB, Armin P., Asthma, Astronautael, Attila v. Wurzbach, Blaue Orchidee, Boggie, Boonekamp, Borovino, C-M, Calined, Calzino, Chricho, ChrisHamburg, Christian2003, ChristianErtl, Cmmrtz, Cooljack82, Daniel FR, Der Franke, Diba, Dogbert66, Dr. Meierhofer, Elian, Engie, EvaK, Fresh0razoR, Fuenfundachtzig, Fuzzy, GNosis, Gbeckmann, Ghghg, Gunther, Hoosic06, Immanuel Giel, Jed, Jeremiah21, Jkbw, Julius1990, Kai11, Karl-Henner, Kats-rule, Kausel, Kersti Nebelsiek, Kladson, Knoerz, Knopfkind, Koala, Koethnig, Lehmkuhl-josef, Liberal Freemason, Lst.000, M justin, Maggot, Markus Mueller, Martin-vogel, Matt1971, Media lib, MichaelDiederich, MichiK, Nosfi, Numbo3, Olei, Ot, PDD, Palica, Peter200, Pfalzfrank, Pfeiffer Latsch, PhJ, Phrood, Pjacobi, R. Nackas, Rauenstein, Retter des B, Ri st, Robert Kropf, Rufus46, Sat Ra, Schewek, Schlurcher, Schmiddtchen, Schnargel, Seb1982, Secular mind, Seewolf, Siebzehnwolkenfrei, Siehe-auch-Löschler, Southpark, Tsor, Tönjes, W!B:, WAH, Weißes strahlenlose Licht, Wikipedia, Wiegels, Wikipus, Wing, Woldemar, Wst, YourEyesOnly, Zenit, Zollernalb, Épa, 114 anonyme Bearbeitungen

Wellenlänge *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=82171995> *Bearbeiter:* 0r14nd0, A.Savin, AHZ, AINUNIA, Alfred Grudszus, Anhi, Arno Matthias, ArtMechanic, Balü, Beelzebubs Grandson, BigBen666, BoP, Boehm, Cepheiden, Crux, Dietzel65, Engie, ErikDunsing, Fairway, Farino, Felix Stember, Fink, Freudissimo, Fubar, GNosis, Gaussianer, Gerbil, Glückseeligkeit, HaSee, Horst Frank, Howwi, Hutschi, Ixitixel, JackDaniels, Jobu0101, Jonny007-MKD, Kai11, Karl Bednarik, Karl-Henner, Kibert, Louis Bafrance, Makaveli, Martin Aggel, Mendax, Michael Lenz, MovGP0, Nd, Night Ink, PassePorte, Pendulin, Proxima, Quark48, Robert Weemeyer, SCPS, SaEfgUA, Schlurcher, Schnurznicole, Schweikhardt, Sechmet, Septembermorgen, Spawn Avatar, Stefan h, Suisui, TCNicole, Thedraguun, Thunar, Ulfbastel, Unscheinbar, WAH, Wdwd, Wikibach, Wipape, Xls, Zahnstein, 127 anonyme Bearbeitungen

Quelle(n), Lizenz(en) und Autor(en) des Bildes

Bild:Tiefendosiskurven.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Tiefendosiskurven.svg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* MBq Disk Bew ; SVG-Umsetzung Cepheiden. Original uploader was Cepheiden at de.wikipedia

Bild:Gamma Abs Al.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gamma_Abs_Al.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* H. Paul

Bild:Gamma Abs Pb.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gamma_Abs_Pb.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* H.Paul

Datei:Atmosphärische Durchlässigkeit DE.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Atmosphärische_Durchlässigkeit_DE.svg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* PNG-Version: Herbertweidner 19:22, 31. Jan. 2008 (CET) SVG-Umsetzung: Cepheiden 18:05, 25. Mär. 2009 (CET). Original uploader was Cepheiden at de.wikipedia

Datei:Radio wave absorbing foam 4.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Radio_wave_absorbing_foam_4.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Mike Peel

Datei:Monitor 1.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Monitor_1.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Ernst Schütte. Original uploader was ErnstA at de.wikipedia

Datei:Synthese+.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Synthese+.svg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Quark67

Datei:spectrum.2400.1800.S.G.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Spectrum.2400.1800.S.G.png> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Bautsch

Datei:Additive RGB Circles-48bpp.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Additive_RGB_Circles-48bpp.png *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* Shlomital, TMg, WikipediaMaster

Datei:Tv_12.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Tv_12.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:Superplus

Datei:Hawk eye.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Hawk_eye.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution 2.0 *Bearbeiter:* Steve Jurvetson

Datei:Maevia inclemens eyes.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Maevia_inclemens_eyes.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution 2.0 *Bearbeiter:* Thomas Shahan

Datei:African Grey Parrot-macro2.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:African_Grey_Parrot-macro2.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Jörg Groß

Datei:Stages in the evolution of the eye (de).png *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Stages_in_the_evolution_of_the_eye_\(de\).png](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Stages_in_the_evolution_of_the_eye_(de).png) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Anthere, Krinkle, Stern, Trockennasenneffe, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Euglena - schema.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Euglena_-_schema.svg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* user:Shazz

Datei:Auge Carybdea marsupialis.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Auge_Carybdea_marsupialis.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution 2.5 *Bearbeiter:* User:Kersti Nebelsiek

Datei:Froschaugen.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Froschaugen.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Fice

Datei:Hauskatze in Abendsonne.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Hauskatze_in_Abendsonne.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Sebastianjude

Datei:Bremse de 2009 detail.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Bremse_de_2009_detail.JPG *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Quaoar10

Datei:Snellen chart.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Snellen_chart.svg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Jeff Dahl

Datei:Netzhautik-polarp.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Netzhautik-polarp.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Anton

Datei:Tränenapparat.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Tränenapparat.svg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* Aka, Erin&David, JD, Noddy93, 12 anonyme Bearbeitungen

Datei:Lateral orbit nerves chngd.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Lateral_orbit_nerves_chngd.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution 2.5 *Bearbeiter:* User:Anka Friedrich

Datei:Eye scheme.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Eye_scheme.svg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Talos, colored by Jakov

Datei:Eye iris.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Eye_iris.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* User:Che

Datei:Pink eye.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Pink_eye.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Original uploader was P33tr at en.wikipedia

Datei:Cataract in human eye.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Cataract_in_human_eye.png *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* Rakesh Ahuja, MD

Datei:Spaltlampe-2.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Spaltlampe-2.jpg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* User:Ralf Roletschek

Datei:Slit lamp.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Slit_lamp.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Original uploader was Jason7825 at en.wikipedia

Datei:AirTrafficControlUSSWashington.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:AirTrafficControlUSSWashington.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* DoD photo by Airman Joe Hendricks, U.S. Navy.Original uploader was Wikifreund at de.wikipedia

Datei:Airplane in-flight information.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Airplane_in-flight_information.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* User:Dschwen

Datei:Bigtellypool.JPG *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Bigtellypool.JPG> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Original uploader was Aaaq at en.wikipedia

Datei:061104 (50).jpg *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:061104_\(50\).jpg](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:061104_(50).jpg) *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Original uploader was Mafmafmaf at en.wikipedia

Bild:Lissajous figure scope 2.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Lissajous_figure_scope_2.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Kordas, Omegatron

Bild:CRT mask types en-de.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:CRT_mask_types_en-de.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Ucc

Bild:Monitor 2.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Monitor_2.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Ernst Schütte. Original uploader was ErnstA at de.wikipedia

Bild:Monitor3.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Monitor3.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Rat, XenonR

Bild:Monitor1.JPG *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Monitor1.JPG> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* ErnstA

Bild:Black-matrix.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Black-matrix.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Original uploader was MasterFX at de.wikipedia

Datei:25-01-08 1250-Himmelsblau.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:25-01-08_1250-Himmelsblau.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Boonekamp

Datei:Color icon blue.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Color_icon_blue.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* AnonMoos, Badseed, Bayo, Booyabazooka, FedericoMP, Mechamind90, Penubag, WikipediaMaster

Datei:Zeichen 380.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Zeichen_380.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Andreas 06, Cfaerber, Cäsium137, Docu, Smurrayinchester, Umherirrender

Datei:Gentiana-clusii-ClusiusEnzian.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gentiana-clusii-ClusiusEnzian.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Migas

Datei:Obi-gokyū.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Obi-gokyū.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Chrk1

Datei:ParusCaeruleus.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:ParusCaeruleus.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* Maximilian Dorsch

Datei:Farb-Check-RGB.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farb-Check-RGB.png> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* DiplomBastler alias Torge Anders

Datei:Fénytörés.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Fénytörés.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Fizped

Datei:GGB reflection in raindrops.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:GGB_reflection_in_raindrops.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Mila Zinkova

Bild:Brechunglufttrp.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Brechunglufttrp.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Anton

Bild:Brechungluftwasserp.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Brechungluftwasserp.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Anton

Bild:brechungluftuwrp.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Brechungluftuwrp.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Anton

Image:Pencil_in_a_bowl_of_water.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Pencil_in_a_bowl_of_water.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Anton, Duesentrieb, Gerbrant, Jean-Jacques MILAN, LX, 3 anonyme Bearbeitungen

Datei:Snells_Law_wavefronts.gif *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Snells_Law_wavefronts.gif *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Oleg Alexandrov

Datei:Dispersion prism.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Dispersion_prism.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Florenco, Pullus In Fabula, Saperaud, Teebeutel, Vadakkan, Ævar Arnfrjóð Bjarmason

Datei:Fresnel reflection coefficients (DE).svg *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Fresnel_reflection_coefficients_\(DE\).svg](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Fresnel_reflection_coefficients_(DE).svg) *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Cepheiden

Datei:Komplexe Brechzahl von Silicium (300 K).svg *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Komplexe_Brechzahl_von_Silicium_\(300_K\).svg](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Komplexe_Brechzahl_von_Silicium_(300_K).svg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Cepheiden

Datei:Brechzahl-einfach.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Brechzahl-einfach.svg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Bluepoke, Original uploader was Bluepoke at de.wikipedia

Datei:Dispersionskurven.PNG *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Dispersionskurven.PNG> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Herbertweidner, Original uploader was Herbertweidner at de.wikipedia

Datei:Dichte_brechzahl.gif *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Dichte_brechzahl.gif *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Alexander Flügel, Original uploader was Afluegel at de.wikipedia

Datei:Chromatizitaet-2-10.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Chromatizitaet-2-10.png> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Boonekamp

Datei:CIE-Normfarbtafel.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:CIE-Normfarbtafel.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:DiplomBastler

Datei:CIE Tristimul.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:CIE_Tristimul.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:DiplomBastler

Datei:CIE Verhältnis.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:CIE_Verhältnis.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:DiplomBastler

Datei:RGB Projektio.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:RGB_Projektio.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:DiplomBastler

Datei:Farbraum & Projektion.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbraum_&_Projektion.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:DiplomBastler

Datei:CIE Hufeisen mit RGB.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:CIE_Hufeisen_mit_RGB.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:DiplomBastler

Datei:Farbkreis Müller-CIE.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbkreis_Müller-CIE.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* DiplomBastler

Datei:CIE RGB-CMYK-Beleucht.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:CIE_RGB-CMYK-Beleucht.png *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:DiplomBastler

Datei:CMYK DIN ISO 2846 1 LAB to RGB.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:CMYK_DIN_ISO_2846_1_LAB_to_RGB.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:FedericoMP, User:TiHa

Datei:CMYK channels demo.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:CMYK_channels_demo.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Bearbeitung TiHa, Foto: <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Luftballong.jpg>

Datei:Cmyk.pdf *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Cmyk.pdf> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Hjsalchow, 4 anonyme Bearbeitungen

Datei:0310-frankfurt-flughafen-fernbahnhof-1.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:0310-frankfurt-flughafen-fernbahnhof-1.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Martinroell

Datei:Roma-foroitalico6.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Roma-foroitalico6.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution 2.0 *Bearbeiter:* Araf, FlickreviewR, Friedrichstrasse, G.dallorto, Mac9, Ronaldino

Datei:YoungHelm.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:YoungHelm.jpg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Analemma

Datei:Onde electromagnetique.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Onde_electromagnetique.svg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* User:Emmanuel.boutet

Datei:Electromagnetic spectrum c.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Electromagnetic_spectrum_c.svg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Horst Frank / Phrood / Anony

Datei:Cone-response.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Cone-response.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* BenduKiwi, Erin SilverSmith, Gpvos, Maxim Razin, Sakurambo, Wars, Was a bee, WikipediaMaster, ۛۛۛۛۛ, 6 anonyme Bearbeitungen

Datei:Waterwave.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Waterwave.svg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Ben g, Original uploader was Ben g at de.wikipedia

Datei:Natriumdampf-strassenlampe.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Natriumdampf-strassenlampe.png> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Boonekamp

Datei:Ostsee-1928-1978.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Ostsee-1928-1978.png> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Boonekamp

Datei:Optical dispersion.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Optical_dispersion.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* Andreas Rejbrand

Datei:Oelfleckerp.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Oelfleckerp.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution 2.0 *Bearbeiter:* User:Anaton

Datei:Moon - False Color Mosaic.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Moon_-_False_Color_Mosaic.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Galileo (NASA)

Datei:Mirau Interference Sample.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Mirau_Interference_Sample.png *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* User:Xorx

Datei:Franz Marc 028.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Franz_Marc_028.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* AndreasPraefcke, BeatrixBelibaste, Emijrp, Kersti Nebelsiek, Pitke, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:PET1.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:PET1.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Friedrich K., Ranveig, Was a bee

Datei:Infrared dog.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Infrared_dog.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* NASA/IPAC

Datei:CMYK farbwuerfel.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:CMYK_farbwuerfel.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Horst Frank, Paddy, SharkD, WikipediaMaster

Datei:a-b-Farbartebe.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:A-b-Farbartebe.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* user:Boonekamp

Datei:A versus Wellenlänge.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:A_versus_Wellenlänge.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* user:Boonekamp

Datei:Colouring pencils.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Colouring_pencils.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:MichaelMaggs

Datei:Farbabstandswahrnehmung HSV.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbabstandswahrnehmung_HSV.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Soeren Gasch

Datei:Colortest2.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Colortest2.png> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* Janke

Datei:Lab-model.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Lab-model.png> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Boonekamp

Datei:HSB-model.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:HSB-model.png> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Boonekamp

Datei:Synthese-.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Synthese-.svg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* Quark67

Datei:Goethe, Farbkreis zur Symbolisierung des menschlichen Geistes- und Seelenlebens, 1809.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Goethe,_Farbkreis_zur_Symbolisierung_des_menschlichen_Geistes-_und_Seelenlebens,_1809.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Original uploader was Luestling at de.wikipedia

Datei:Farbrhomboder.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbrhomboder.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Harald KüppersOriginal uploader was Boonekamp at de.wikipedia

Datei:CMYK farbwuerfel.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:CMYK_farbwuerfel.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Horst Frank, Paddy, SharkD, WikipediaMaster

Datei:Spectrum.2400.1800.S.G.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Spectrum.2400.1800.S.G.png> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Bautsch

Datei:Rechteckspektrum sRGB.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Rechteckspektrum_sRGB.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* own work

Datei:Flamingo-tri.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Flamingo-tri.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Dr. Hagemann, Howwi, 2 anonyme Bearbeitungen

Datei:Flamingo-Achro.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Flamingo-Achro.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Dr. Hagemann

Datei:Flamingo-di.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Flamingo-di.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Dr. Hagemann

Datei:Schema-Netzhaut-gesund.JPG *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Schema-Netzhaut-gesund.JPG> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Dr. Hagemann

Datei:Schema-Netzhaut-Achromatopsie.JPG *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Schema-Netzhaut-Achromatopsie.JPG> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Dr. Hagemann

Datei:MunsellColorWheel.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:MunsellColorWheel.svg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution 3.0 *Bearbeiter:* User:Thenoizz

Datei:Farbkreis Itten 1961.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbkreis_Itten_1961.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:SidShakal

Datei:Farbrhomboder.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbrhomboder.svg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Chrkl

Datei:Farbenkreis küppers svg.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbenkreis_küppers_svg.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Hewin (der SVG-Fassung)

Datei:Farbfernsehen 1967.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbfernsehen_1967.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Kapitän Nemo, Leipnizkexs, Peter Littmann

Datei:Electron_gun.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Electron_gun.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 Germany *Bearbeiter:* Benutzer:Superplus. Original uploader was Superplus at de.wikipedia

Datei:Color-TVUnitsGermany.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Color-TVUnitsGermany.png> *Lizenz:* Creative Commons Attribution 3.0 *Bearbeiter:* User:Wikifreund

Datei:Stamps of Germany (Berlin) 1982, MiNr 668.jpg *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Stamps_of_Germany_\(Berlin\)_1982_MiNr_668.jpg](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Stamps_of_Germany_(Berlin)_1982_MiNr_668.jpg) *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* User:Nightflyer

Datei:NTSC-PAL-SECAM_de.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:NTSC-PAL-SECAM_de.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Andreas -horn- Hornig, Head, Phrood, Responsible?, WikipediaMaster

Image:Farbfilm.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbfilm.png> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Metoc, 3 anonyme Bearbeitungen

Datei:Farbkreis Müller-CIE Karmin.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbkreis_Müller-CIE_Karmin.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Torge Anders Original uploader was DiplomBastler at de.wikipedia

Datei:Farbabstandswahrnehmung_HSV.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbabstandswahrnehmung_HSV.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Soeren Gasch

Datei:LYS05 Newton colour circle.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:LYS05_Newton_colour_circle.JPG *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Haabet, Rocket000, TommyBee

Datei:Boutet 1708 color circles.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Boutet_1708_color_circles.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* C. B. (probably Claude Boutet)

Datei:GoetheFarbkreis.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:GoetheFarbkreis.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Goethe, via Prof. Dr. Hans Irtel

Datei:Ewald hering colors.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Ewald_hering_colors.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Grafik selbst erstellt. Tilo Hauke

Datei:Bezold Farbentafel 1874.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Bezold_Farbentafel_1874.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Wilhelm von Bezold

Datei:RYB color circle 1904.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:RYB_color_circle_1904.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Hugo B. Froehlich and Bonnie E. Snow

Datei:RGV color wheel 1908.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:RGV_color_wheel_1908.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* J. Arthur H. Hatt

Datei:Opponent color circle 1917.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Opponent_color_circle_1917.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Charles Hubbard Judd

Datei:Color wheel 1895.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Color_wheel_1895.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Edward Wheeler Scripture

Datei:Scriabin-Circle.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Scriabin-Circle.png> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:MegaMatic

Datei:Color circle (hue-sat).png *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Color_circle_\(hue-sat\).png](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Color_circle_(hue-sat).png) *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Avsa

Datei:Kleurencirkel2.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Kleurencirkel2.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Original uploader was Ellywa at nl.wikipedia

Datei:Kleurenschijf-rgb-maxint.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Kleurenschijf-rgb-maxint.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Original uploader was Koenb at nl.wikipedia

Datei:Triangulo HSV.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Triangulo_HSV.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Samus_

Datei:Komplementär.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Komplementär.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Crux, Golden arms, LabFox, Schubbay, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Farbkreis Newton.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbkreis_Newton.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* user: donald-

Datei:Farbkreis mit CMYK-Werten.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbkreis_mit_CMYK-Werten.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* SYS64738

Datei:Farbkreis Itten 1961.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbkreis_Itten_1961.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:SidShakal

Datei:KueppersColorsSun.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:KueppersColorsSun.svg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution 3.0 *Bearbeiter:* User:McSush

Datei:LED Spektren.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:LED_Spektren.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Saperaud

Bild:Purpur-mit-Ausfaerbung.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Purpur-mit-Ausfaerbung.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Diskussion:Purpur_%28Farbstoff%29

Bild:CIExy1931.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:CIExy1931.svg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* User:Sakurambo

Datei:Farbschuhssole.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbschuhssole.jpg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Belegghil, MartinWoelker, Thomaswm

Datei:Farbstruktur.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbstruktur.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Friedrich Graf

Datei:Runge Farbenkugel.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Runge_Farbenkugel.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Anypodetos, Dicklyon, Jacobolus, Mattes, SharkD, Tano4595, WikipediaMaster

Datei:AdditivRGBFarb.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:AdditivRGBFarb.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Friedrich Graf

Datei:AdditivCMYFarb.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:AdditivCMYFarb.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Friedrich Graf

Datei:RGB color solid cube.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:RGB_color_solid_cube.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:SharkD

Datei:RGB farbwuerfel.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:RGB_farbwuerfel.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Andreas -horn- Hornig, Horst Frank, Paddy, SharkD, WikipediaMaster, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Gamut_ISOC coated_and_sRGB.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gamut_ISOC coated_and_sRGB.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Mukk

Datei:Inkjet s.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Inkjet_s.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Ulfbastel

Datei:HK5-K-Farbfächer.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:HK5-K-Farbfächer.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 *Bearbeiter:* User:Threedots

Datei:Schärfemuster8.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Schärfemuster8.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Friedrich Graf

Datei:Aminoazobenzol Delokalisation.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Aminoazobenzol_Delokalisation.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:NEUROtiker

Datei:Aminoazobenzol 1.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Aminoazobenzol_1.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:NEUROtiker

Datei:Synthesis of Organol Brown N.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Synthesis_of_Organol_Brown_N.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Yikrazuul

Datei:Synthesis of malachite green.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Synthesis_of_malachite_green.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Yikrazuul

Datei:Procionbrilliantorange GS.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Procionbrilliantorange_GS.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Yikrazuul

Datei:Anthrachinon.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Anthrachinon.svg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:NEUROtiker

Datei:Indanthren.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Indanthren.svg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:NEUROtiker

Datei:Alizarin.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Alizarin.svg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:NEUROtiker

Datei:Alizarinengelb_R.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Alizarinengelb_R.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:NEUROtiker

Datei:Kongorot.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Kongorot.svg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:NEUROtiker

Datei:dioxazin02.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Dioxazin02.svg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Roland Mattern Original uploader was Roland1952 at de.wikipedia

Datei:Pikrinsäure.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Pikrinsäure.svg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:NEUROtiker

Datei:Amido Yellow E.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Amido_Yellow_E.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Yikrazuul

Datei:Pigment green B.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Pigment_green_B.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Yikrazuul

Datei:Naphthol Green B.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Naphthol_Green_B.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Yikrazuul

Datei:Saturation change photoshop.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Saturation_change_photoshop.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Akinom, Roke, Wikipedia:Master, Ö

Datei:Whitebalance4.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Whitebalance4.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Thomas Steiner

Datei:Farbtemperaturmessung sixtomatx3.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbtemperaturmessung_sixtomatx3.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Jkwb

Datei:Color temperature sRGB.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Color_temperature_sRGB.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Phrood

Datei:ZapfenAbsorption.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:ZapfenAbsorption.png> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Original uploader was Hati at de.wikipedia

Datei:ZapfenEmpfindlichkeit.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:ZapfenEmpfindlichkeit.png> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Original uploader was Hati at de.wikipedia

Datei:Zapfen mensch-rhesus.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Zapfen_mensch-rhesus.png *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:Arno Matthias

Datei:Sonnenschirm-vierfarbig.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Sonnenschirm-vierfarbig.png> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* user:Boonekamp

Datei:Vlambdaps.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Vlambdaps.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Anton, Chemiefrk, Denniss, DerHexer, N-regen, Tofra, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Farbbildung1.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbbildung1.jpg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Friedrich Graf

Datei:4chromat.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:4chromat.png> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Forrester, Hati, Jodo, Matthias M., 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:ZapfenEvolution.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:ZapfenEvolution.png> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Original uploader was Hati at de.wikipedia

Datei:Trees-are-green.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Trees-are-green.png> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Boonekamp

Datei:FluoriteUV.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:FluoriteUV.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* Didier Descouens

Datei:Www Beo cc.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Www_Beo_cc.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Beo

Datei:Leuchtstofflampen-ctaube050409.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Leuchtstofflampen-ctaube050409.jpg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* User:Chtaube, User:Deglr6328

Datei:VFD2.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:VFD2.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Ulfbastel

Datei:FPbeachTsien.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:FPbeachTsien.jpg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* AndrewHires

Datei:AgarosegelUV.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:AgarosegelUV.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* TransControl

Datei:Fluorescent minerals hg.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Fluorescent_minerals_hg.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* User:Hgrobe

Datei:Euscorpius_fg01.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Euscorpius_fg01.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Dysmachus

Datei:Nile red 01.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Nile_red_01.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Kuebi

Bild:Marokko Fes - GerberFaerber 03.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Marokko_Fes_-_GerberFaerber_03.jpg *Lizenz:* Attribution *Bearbeiter:* anonymous; permission given

Bild:färbewerkstatt1.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Färbewerkstatt1.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Hildensia

Bild:Färber.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Färber.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* LutzBruno

Bild:DSC00760.JPG *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:DSC00760.JPG> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Durova, Saharadesertfox, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Faerberwaid.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Faerberwaid.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Leipnizkeks

Datei:Isatis tinctoria 001.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Isatis_tinctoria_001.JPG *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* H. Zell

Datei:Isatis tinctoria 002.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Isatis_tinctoria_002.JPG *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* H. Zell

Datei:Isatis tinctoria Sturm28.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Isatis_tinctoria_Sturm28.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Johann Georg Sturm (Painter: Jacob Sturm)

Image:Waidstein Sömmerda.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Waidstein_Sömmerda.JPG *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* User:Michael Sander

Datei:Nachbild.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Nachbild.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Mikue

Datei:Opponent colors.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Opponent_colors.svg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* User:Spooky

Datei:Gegenfarben.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gegenfarben.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Juni9

Datei:Farbraum gegenfarbentheorie.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbraum_gegenfarbentheorie.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Juni9

Datei:Yellow spectra Abney 1891.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Yellow_spectra_Abney_1891.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Original uploader was Dicklyon at en.wikipedia

Datei:CIExy1931 sRGB.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:CIExy1931_sRGB.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Adoniscik, Duesentrieb, Glenn, Mysid, PAR, W!B., Wikipedia:Master, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Lemon.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Lemon.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* user:Aka

Datei:Yellow.tang.arp.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Yellow.tang.arp.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Adrian Pingstone

Datei:Caltha palustris 01.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Caltha_palustris_01.JPG *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* User:Lilly M

Datei:Zeichen 306.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Zeichen_306.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Andreas 06, Cfaerber, Cäsium137, KaragouniS, MB-one, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Andwil Oberarnegg Briefkasten.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Andwil_Oberarnegg_Briefkasten.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Ikiwaner, JackyR, Luigi Chiesa, Michael Romanov, Neizham

Datei:Gluehlampe 01 KMJ.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gluehlampe_01_KMJ.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Edokter

Datei:Wolfram-Halogenglühlampe.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Wolfram-Halogenglühlampe.png> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Reinraum

Datei:Symbol Visual indicator1.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Symbol_Visual_indicator1.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:RokerHRO

Datei:Gluehbirne 2 db.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gluehbirne_2_db.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Dickbauch, Dmitry G, Mattes

Datei:Edisonsgluehlampe.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Edisonsgluehlampe.png> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Original uploader was Staro1 at de.wikipedia

Datei:Electric bulb filament.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Electric_bulb_filament.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Arnoldius

Datei:E40_Glühbirne_500Watt.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:E40_Glühbirne_500Watt.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Lusile, Medvedev

Datei:glueh_r.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Glueh_r.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Ulfbastel

Datei:Wirkungsgrad gluehbirne.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Wirkungsgrad_gluehbirne.svg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Cepheiden, Chaddy, Guandalug, Kam Solusar, Louisana, Regi51, Sinn, Stefan 024, 7 anonyme Bearbeitungen

Datei:helldiagram.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Helldiagram.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Ulfbastel

Datei:Gluelebensdauer.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gluelebensdauer.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Saftorangen, Saperaud

Datei:Halogen-Gluehbirne.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Halogen-Gluehbirne.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Dmitry G, Saperaud

Datei:TungstenFilamentHalogenH1Lamp.JPG *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:TungstenFilamentHalogenH1Lamp.JPG> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* Rolf Süßbrich

Datei:Glühwendel.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Glühwendel.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Moehre1992

File:Gluehlampe doppelt matt.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gluehlampe_doppelt_matt.JPG *Lizenz:* Creative Commons Attribution 3.0 *Bearbeiter:* User:Wefo

Datei:Halogen lamp 230V.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Halogen_lamp_230V.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:GLammel

Datei:Bilux.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Bilux.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Ulfbastel

Datei:Blinkgluehlampe Bimetall animated.gif *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Blinkgluehlampe_Bimetall_animated.gif *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Phrontis

Datei:Thomas edison glühbirne.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Thomas_edison_glühbirne.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* unbekannt. Original uploader was Head at de.wikipedia

Datei:Bulb of Carl Heinrich Florenz Müller.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Bulb_of_Carl_Heinrich_Florenz_Müller.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Xorx

Datei:carbonfilament.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Carbonfilament.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Ulfbastel

Datei:Energieeffizienz 100W.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Energieeffizienz_100W.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Traut

Datei:E27 with 38 LCD.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:E27_with_38_LCD.JPG *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* D-Kuru, Dmitry G, Mion, Ochro, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:leds.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Leds.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Ulfbastel

Datei:Baum1.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Baum1.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Boonekamp

Datei:Walnussbaum Fritz 2006.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Walnussbaum_Fritz_2006.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Hedwig Storch

Datei:Flag of Libya.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Flag_of_Libya.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* 16@r, Anime Addict AA, AnonMoos, Avala, Azylber, Bapho, EugeneZelenko, Flad, Fred J, Fry1989, Homo lupus, J.delanoy, JR98664, Klemen Kocjancic, MaggotMaster, Mattes, Nematavka, Neq00, Olavfin, Ouloedmonds1, Paradoctor, Reisio, Rocket000, Simetrical, Str4nd, Supern401, Udonknome, Vz83, Wutsje, X1, Zscout370, 14 anonyme Bearbeitungen

Bild:LightningVolt Deep Blue Sea.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:LightningVolt_Deep_Blue_Sea.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Photo by Lars Lentz

Datei:Duisburg_Lehmbruck_IR_normal.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Duisburg_Lehmbruck_IR_normal.JPG *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:AlterVista. Original uploader was AlterVista at de.wikipedia

Datei:Duisburg_Lehmbruck_IR_IR.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Duisburg_Lehmbruck_IR_IR.JPG *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:AlterVista. Original uploader was AlterVista at de.wikipedia

Datei:IR-SAN.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:IR-SAN.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* RedPiranha. Original uploader was RedPiranha at de.wikipedia

Datei:Andromeda_galaxy_Ssc2005-20a1.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Andromeda_galaxy_Ssc2005-20a1.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Ceranthor, User:Noodle snacks, User:Superborsuk

Datei:IrDA USB.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:IrDA_USB.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* Bartekbas

Datei:24-Hour Operations.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:24-Hour_Operations.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Spe. Jeffery Sandstrum

Datei:Euro infratot.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Euro_infratot.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Big.N. Original uploader was Big.N at de.wikipedia

Datei:Komplementarfarbige-schatten.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Komplementarfarbige-schatten.png> *Lizenz:* Creative Commons Zero *Bearbeiter:* User:Boonekamp

Datei:Cyan-auf-komplementären-Rot.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Cyan-auf-komplementären-Rot.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Boonekamp

Datei:Komplementär-orange-vor-cyan.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Komplementär-orange-vor-cyan.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* user:Boonekamp

Datei:Komplementär-hellgelb-auf-dblau.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Komplementär-hellgelb-auf-dblau.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* user:Boonekamp

Datei:Farbfilterbrille Rot Blau.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farbfilterbrille_Rot_Blau.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Stefan Kühn
Original uploader was Stefan Kühn at de.wikipedia

Datei:3D-glasses.gif *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:3D-glasses.gif> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Original uploader was Wittkowsky at de.wikipedia

Datei:Male Anolis carolinensis - more contrast.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Male_Analis_carolinensis_-_more_contrast.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Euku

Datei:Male Anolis carolinensis.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Male_Analis_carolinensis.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Euku

Datei:Male Anolis carolinensis - less contrast.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Male_Analis_carolinensis_-_less_contrast.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Euku

Bild:DIN-Logo.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:DIN-Logo.svg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* unbekannt. Original uploader was Afrank99 at de.wikipedia. Later version(s) were uploaded by Schnelliboy at de.wikipedia.

Datei:L-versus-Lambda.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:L-versus-Lambda.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* user:Boonekamp

Datei:a versus Wellenlänge.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:A_versus_Wellenlänge.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* user:Boonekamp

Datei:b versus Wellenlänge.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:B_versus_Wellenlänge.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* user:Boonekamp

Datei:CIE Lab RGB CMYK.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:CIE_Lab_RGB_CMYK.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Die zuckerschnute, Stefan Kühn

Datei:Laser DSC09088.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Laser_DSC09088.JPG *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 *Bearbeiter:* Copyright © 2004 David Monniaux

Datei:Lasing.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Lasing.svg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:LarsOliverLutsch

Datei:Laser.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Laser.svg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* User:Tatoute

Datei:Commercial_laser_lines.de.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Commercial_laser_lines.de.svg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Danh

Datei:Carbon Monoxide Laser 1968.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Carbon_Monoxide_Laser_1968.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* U.S. Navy - Office of Naval Research

Datei:He-Ne-Laser.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:He-Ne-Laser.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Andys, Philipweb, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Confokal Resonator.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Confokal_Resonator.png *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:Herbertweidner

Datei:Harmonic partials on strings.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Harmonic_partials_on_strings.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Qef

Datei:LaserModes.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:LaserModes.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Wolfgang.geithner

Datei:Gauss Profil.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gauss_Profil.svg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:Herbertweidner

Datei:Laguerre-gaussian.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Laguerre-gaussian.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Original uploader was DrBob at en.wikipedia Later version(s) were uploaded by Keenan Pepper at en.wikipedia.

Datei:TEMmn.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:TEMmn.png> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Blackno666

Datei:Lasergravur.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Lasergravur.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Ulfbastel

Datei:Laserapfel.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Laserapfel.jpg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* MPF, Metoc, Rocket000, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:DIN 4844-2 Warnung vor Laserstrahl D-W010.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:DIN_4844-2_Warnung_vor_Laserstrahl_D-W010.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:DrTorstenHenning

Datei:Symbol LED.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Symbol_LED.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Original uploader was MovGP0 at de.wikipedia

Datei:LED-Aufbau (Schema).svg *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:LED-Aufbau_\(Schema\).svg](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:LED-Aufbau_(Schema).svg) *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* SVG-Version von Cepheiden. Original uploader was Cepheiden at de.wikipedia

Datei:Uvled highres macro.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Uvled_highres_macro.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution 3.0 *Bearbeiter:* User:Grapetonix

Datei:Led reflector.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Led_reflector.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* User:Mr.checker

Datei:Smd led.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Smd_led.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution 3.0 *Bearbeiter:* Thomas Wydra

Datei:Bandmodellkrp.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Bandmodellkrp.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Anton (rp)

Datei:RGB-SMD-LED.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:RGB-SMD-LED.jpg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Sonic74

Datei:uv-LED.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Uv-LED.jpg> *Lizenz:* Attribution *Bearbeiter:* Denniss, Glenn, Saperaud, Severino666, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:LED weiss P blau.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:LED_weiss_P_blaue.svg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* original: Cepheiden crop by iogos82

Datei:LED weiss P UV.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:LED_weiss_P_UV.svg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* original: Cepheiden crop by iogos82

Datei:LED weiss phosphor.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:LED_weiss_phosphor.svg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 *Bearbeiter:* User:Cepheiden

Datei:LED Querschnitt bestromt.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:LED_Querschnitt_bestromt.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Urgent necessity

Datei:LED-Digitalur.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:LED-Digitalur.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Dmitry G, Flyout, Jamin, Saperaud, WikipediaMaster, Wst

Datei:Bike lights2.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Bike_lights2.JPG *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Danielle_dk

Datei:Tokyo-Station-2005-7-21 3.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Tokyo-Station-2005-7-21_3.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Araisyohei

Datei:Led_streetlight.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Led_streetlight.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* User:Cgwalther

Datei:LED Halogen.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:LED_Halogen.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* D-Kuru, Dmitry G, Glenn, Paradoctor, Saperaud, Severino666

Datei:A6_avant_c6_led.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:A6_avant_c6_led.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Original uploader was WikiPimpi at de.wikipedia (Original text : WikiPimpi)

Datei:Led ampel dk.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Led_ampel_dk.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 *Bearbeiter:* Original uploader was Butz at de.wikipedia

Datei:VW T5-Blaulicht-LED.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:VW_T5-Blaulicht-LED.JPG *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* Јαϥκτδ • Disk. • MP. Original uploader was Jacktd at de.wikipedia

Datei:SIC LED historic.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:SiC_LED_historic.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Biolippi

Datei:Haitz law.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Haitz_law.svg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Thorseth

Datei:Maximallichtausbeute bei 100% Wirkungsgrad.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Maximallichtausbeute_bei_100%_Wirkungsgrad.png *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Frank Klemm, Jodo

Datei:Ledwhitecharcurp.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Ledwhitecharcurp.png> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* Anton

Datei:Konstantstromquelle jfet 2.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Konstantstromquelle_jfet_2.png *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* Glenn, Ma-Lik, Wdwd

Datei:Spectre.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Spectre.svg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Phrood, User:Tatoute

Datei:Spectrum-sRGB-low.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Spectrum-sRGB-low.svg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Phrood

Datei:Farb.Temp.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Farb.Temp.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Eule4404

Datei:NCS-System.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:NCS-System.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer: DiplomBastler

Datei:SubMischMetam.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:SubMischMetam.svg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:Analemma

Datei:Gray875 German translation.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gray875_German_translation.png *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* User:Paunaro

Datei:Retinography.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Retinography.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Ske.

Datei:Retina-diagram.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Retina-diagram.svg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Anka Friedrich, User:Chrkl

Datei:Cone-response.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Cone-response.svg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Maxim Razin

Datei:Retina.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Retina.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Peter Hartmann at de.wikipedia, edited by Marc Gabriel Schmid

Datei:Schema Retina.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Schema_Retina.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 *Bearbeiter:* Original uploader was Jan R at de.wikipedia

Datei:Retina-OCT800.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Retina-OCT800.png> *Lizenz:* Creative Commons Attribution 2.0 *Bearbeiter:* Dietzel65, Maksim, Was a bee, Wst

Datei:Table of Opticks, Cyclopaedia, Volume 2.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Table_of_Opticks,_Cyclopaedia,_Volume_2.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Brian0918, Dicklyon, LaosLos

Datei:Kepler-Fernrohr (Schema).svg *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Kepler-Fernrohr_\(Schema\).svg](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Kepler-Fernrohr_(Schema).svg) *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:Cepheiden, Benutzer:Sgbeer

Datei:Refraction_on_an_aperture - Huygens-Fresnel principle.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Refraction_on_an_aperture_-_Huygens-Fresnel_principle.svg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* User:Norro

Datei:PrismAndLight_gespiegelt.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:PrismAndLight_gespiegelt.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:Analemma, Benutzer:Analemma/PrismaNN

Datei:Scissors_glasses.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Scissors_glasses.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:RSekulovich

Datei:VitaminC.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:VitaminC.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Claudius Tesch

Datei:Optical grey squares orange brown.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Optical_grey_squares_orange_brown.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Dr Greg, JunCTionS, Kostmo, 10 anonyme Bearbeitungen

Datei:Sunset in Landshut.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Sunset_in_Landshut.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:kermano

Datei:Buddhist child 02.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Buddhist_child_02.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Tevaprapas, Xupu

Datei:Digital Multimeter Aka.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Digital_Multimeter_Aka.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* user:Aka

Datei:Light-clock.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Light-clock.png> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* User:schmid

Datei:Navstar-2.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Navstar-2.jpg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Bricktop, GDK, Ustas

Datei:Sir Isaac Newton by Sir Godfrey Kneller, Bt.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Sir_Isaac_Newton_by_Sir_Godfrey_Kneller_Bt.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Dcoetzee

Datei:Stamp Albert Einstein 2005.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Stamp_Albert_Einstein_2005.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* User:Prolineserver

Datei:Logo vom Jahr der Physik (2005).jpg *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Logo_vom_Jahr_der_Physik_\(2005\).jpg](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Logo_vom_Jahr_der_Physik_(2005).jpg) *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Brackenheim, Sa-se

Datei:Turquoise.pebble.700pix.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Turquoise.pebble.700pix.jpg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* FoeNyx, Fred J, Man vyi, Pfctdayelise, Ra'ike, Saperaud, Slomox, Suguri F, Wars, Wela49

Datei:Ultramarinepigment.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Ultramarinepigment.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Calvero, Liftarn, Man vyi, WikipediaMaster

Datei:Trilead tetraoxide.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Trilead_tetraoxide.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Walkerma

Datei:CI_Pigment_Yellow_151.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:CI_Pigment_Yellow_151.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Sponk

Datei:Cinnabar.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Cinnabar.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Andel, Cfaerber, Saperaud, Slomox, Wela49, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Iron oxide red y.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Iron_oxide_red_y.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:FK1954

Datei:Bismuthvanadat.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Bismuthvanadat.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:FK1954

Datei:Carbon black.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Carbon_black.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:FK1954

Datei:Typical azo compound.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Typical_azo_compound.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Ragimiri

Datei:Phthalocyanine_blue.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Phthalocyanine_blue.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:FK1954

Datei:Pigment-perlowy-wielobarwny.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Pigment-perlowy-wielobarwny.svg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Nux

Datei:Color flop blue gold.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Color_flop_blue_gold.JPG *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:FK1954

Datei:Interference pigment gold.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Interference_pigment_gold.JPG *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:FK1954

Datei:Rising circular.gif *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Rising_circular.gif *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Pieter Kuiper, Theredmonkey

Datei:Polarisation p.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Polarisation_p.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Fffred

Datei:Polarisation (Linear).svg *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Polarisation_\(Linear\).svg](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Polarisation_(Linear).svg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* inductiveload

Datei:Polarisation (Circular).svg *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Polarisation_\(Circular\).svg](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Polarisation_(Circular).svg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* inductiveload

Datei:Polarisation (Elliptical).svg *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Polarisation_\(Elliptical\).svg](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Polarisation_(Elliptical).svg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Inductiveload

Datei:Prism-side-fs PNr°0117.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Prism-side-fs_PNr°0117.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* D-Kuru

Datei:Prism-rainbow.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Prism-rainbow.svg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Suidroot

Datei:Strahlengang in einem Prisma.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Strahlengang_in_einem_Prisma.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Cepheiden

Datei:Partial transmittance.gif *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Partial_transmittance.gif *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Oleg Alexandrov

Datei:Matterhorn Riffelsee 2005-06-11.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Matterhorn_Riffelsee_2005-06-11.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* User:Dirk Beyer

Datei:Reflexion im Wellenmodell.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Reflexion_im_Wellenmodell.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* 09:02, 21. Mai 2009 (CEST)

Datei:Shallow water waves 250px.gif *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Shallow_water_waves_250px.gif *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* A.Fiebig, Pieter Kuiper, R. Koot

Datei:Wave equation 1D fixed endpoints.gif *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Wave_equation_1D_fixed_endpoints.gif *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Oleg Alexandrov

Datei:Reflexion.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Reflexion.svg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Tim Hellwig

Datei:Fényvisszaverődés.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Fényvisszaverődés.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* Zátanyi Sándor (ifj.)

Datei:Circle reflect wikipedia.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Circle_reflect_wikipedia.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Dachris, Mattes, Metoc, Plindenbaum, Saibo, ~Pyb

Datei:Diffracao.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Diffracao.svg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Davepape, Marcelo Reis, Pieter Kuiper, 5 anonyme Bearbeitungen

Datei:Silver at the plasma edge (DE).svg *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Silver_at_the_plasma_edge_\(DE\).svg](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Silver_at_the_plasma_edge_(DE).svg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Cepheiden

Datei:Koaxialleitung_schema_abgeschlossen.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Koaxialleitung_schema_abgeschlossen.png *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:JoBa2282

Datei:Akustik Raumimpulsantwort.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Akustik_Raumimpulsantwort.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Laku.online, Skyhead

Datei:Partielle_Clapotis.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Partielle_Clapotis.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Mendax, 3 anonyme Bearbeitungen

Datei:Double-alaskan-rainbow.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Double-alaskan-rainbow.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* Eric Rolph

Datei:Melbourne_Regenbogen.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Melbourne_Regenbogen.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:AlterVista

Datei:Prism rainbow schema.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Prism_rainbow_schema.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Adoniscik, HenkVD, Joanjo, Ranveig, Saperaud, Suidroot, Teebeutel, Ustas, Ævar Armfjörð Bjarmason, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Prism compare rainbow 01.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Prism_compare_rainbow_01.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Andys

Datei:Rainbow1.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Rainbow1.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* KES47, Pieter Kuiper, Saperaud, Wst, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Rainbow rays de.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Rainbow_rays_de.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Analemma, Andys

Datei:Rainbow seen by the eye.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Rainbow_seen_by_the_eye.png *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* User:Andys

Datei:Rainbow angles.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Rainbow_angles.png *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* Pieter Kuiper, Saperaud, Wst

Datei:Regenbogen-Aussichtsturm.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Regenbogen-Aussichtsturm.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* Kreuzschnabel

Datei:RainbowFormation_DropletSecondary.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:RainbowFormation_DropletSecondary.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* FML, Ies, Ikarus, Pieter Kuiper, Roomba, Teebeutel, Wst

Datei:Regenbogen_(NASA).jpg *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Regenbogen_\(NASA\).jpg](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Regenbogen_(NASA).jpg) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Saperaud, Snowmanradio, Xosema, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Supernumerary rainbow 03 contrast.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Supernumerary_rainbow_03_contrast.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Andrew Dunn

Datei:Rainbow light waves de.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Rainbow_light_waves_de.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Benutzer:Ireas

Datei:Nebelbogen.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Nebelbogen.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* BLueFiSH.as, Saperaud, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:ReflectionRainbow.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:ReflectionRainbow.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Original uploader was Tlatla at en.wikipedia

Datei:Brunnen im palmengarten.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Brunnen_im_palmengarten.jpg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Big.N. Original uploader was Big.N at de.wikipedia

Datei:Waves_in_pacifica_3.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Waves_in_pacifica_3.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Mila Zinkova

Datei:Zirkum.JPG *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Zirkum.JPG> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Mats Halldin, Saperaud

Datei:Descartes Rainbow.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Descartes_Rainbow.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Pieter Kuiper, Wst, Zureks

Datei:Joseph Anton Koch 006.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Joseph_Anton_Koch_006.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* AndreasPraefcke, BeatrixBelibaste, Erikwkolstad, Goldfritha, Kersti Nebelsiek, Mattes, Melkom, Rsberzerker, Shakko, Skipjack, Wst, Xenophon, 3 anonyme Bearbeitungen

Datei:Gay flag.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gay_flag.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Anime Addict AA, AnonMoos, Duduziq, Elena, Fibonacci, Fry1989, G.dallorto, Guanaco, Homo lupus, Keepsases, Miko3k, Mormegil, Muhandis, Mwtoews, Optigan13, Roman 92, Rtc, Technion, User0529, Walden69, 28 anonyme Bearbeitungen

Datei:Joseph Anton Koch 005.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Joseph_Anton_Koch_005.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* AndreasPraefcke, Emijrp, Erikwkolstad, Goldfritha, Mattes, Sitacuisses, Wst

Datei:Collioure Regenbogen.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Collioure_Regenbogen.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* AlterVista

Bild:Remission.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Remission.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Denniss, Nephelin

Bild:Remission2.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Remission2.png> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Denniss, Nephelin

Datei:RGB farbwuerfel.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:RGB_farbwuerfel.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Andreas -horn- Hornig, Horst Frank, Paddy, SharkD, WikipediaMaster, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Red LED Spectrum .gif *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Red_LED_Spectrum_.gif *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Adoniscik, Eno

Datei:Scharlach.JPG *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Scharlach.JPG> *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* DO11.10, Grook Da Oger, Kronawitter, Patho

Datei:Bleeding finger.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Bleeding_finger.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution 2.0 *Bearbeiter:* Dodo, FlickreviewR, Grafite, Nilfanion, Southgeist

Datei:WilderWeinBeeren.JPG *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:WilderWeinBeeren.JPG> *Lizenz:* Creative Commons Attribution 3.0 *Bearbeiter:* User:IKAI

Datei:Zeichen 206.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Zeichen_206.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Augiasstallputzer, Cfaerber, Cäsium137, D0ktorz, Kazuya360, MB-one, SchirmerPower, Timo Müller, Umherirrender, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Tettamanzi.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Tettamanzi.jpg> *Lizenz:* Creative Commons Attribution 2.0 *Bearbeiter:* User a town called malice on Flickr

Datei:Cosimodemeditheolder.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Cosimodemeditheolder.jpg> *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Diwas, G.dallorto, Grenavitar, Interpretix, Kilom691, Mattes, Quadell, Richardfabi, Semnoz, Shakko, Sir Gawain, Sparkit, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:SPD logo.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:SPD_logo.svg *Lizenz:* Trademarked *Bearbeiter:* User:Dbenzhuser

Datei:Flag of the Soviet Union.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Flag_of_the_Soviet_Union.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* A1, Alex Smotrov, Alvis Jean, Art-top, BagnoHax, Denniss, EugeneZelenko, F l a n k e r, Fred J, G.dallorto, Garynysmon, Herbythyme, Homo lupus, Jake Wartenberg, MaggotMaster, Ms2ger, Nightstallion, Pianist, R-41, Rainforest tropicana, Sebyugez, Solbris, Storkk, Str4nd, Tabasco, ThomasPusch, Toben, Twilight Chill, Zscout370, Ceph, 55 anonyme Bearbeitungen

Datei:Dan Gürtel.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Dan_Gürtel.jpg *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Benutzer:Hoosic06

Datei:Solar eclips 1999 4.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Solar_eclips_1999_4.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* user:Lviatour

Datei:Black pog.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Black_pog.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Andux, Antonsusi, Juiced lemon, Lzhl, Mattes, STyx, TwoWings

Datei:Mercedes S-Klasse (W221) 20090611 front.JPG *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Mercedes_S-Klasse_\(W221\)_20090611_front.JPG](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Mercedes_S-Klasse_(W221)_20090611_front.JPG) *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Matthias93

Datei:Jack Black.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Jack_Black.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Mayhew, H.

Datei:Sonne Strahlungsintensitaet.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Sonne_Strahlungsintensitaet.svg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 *Bearbeiter:* Original uploader was Degreen at de.wikipedia. Later version(s) were uploaded by Quilbert at de.wikipedia.

Datei:Thuill astme590 lambda.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Thuill_astme590_lambda.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* NASA /NOAA

Datei:Atmosphäre - Undurchlässigkeit des EM-Spektrums.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Atmosphäre_-_Undurchlässigkeit_des_EM-Spektrums.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Matthias M.

Datei:Oblique rays 04 Pengo.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Oblique_rays_04_Pengo.svg *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Pengo, Pymouss, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Spectral color in broken ice 02.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Spectral_color_in_broken_ice_02.JPG *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.5 *Bearbeiter:* User:Böhringer

Datei:HR-diag-no-text-3.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:HR-diag-no-text-3.svg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Spacepotato, geändert Original uploader was FrancescoA at de.wikipedia

Datei:Early spectral seq.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Early_spectral_seq.png *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Rivi

Datei:Early LC seq.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Early_LC_seq.png *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Rivi

Bild:Morgan-Keenan spectral classification.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Morgan-Keenan_spectral_classification.png *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Alfio, EugeneZelenko, Kheider, Kieff, Orelec, Snailly

Bild:Schema Retina.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Schema_Retina.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 *Bearbeiter:* Original uploader was Jan R at de.wikipedia

Datei:Jupiter.Aurora.HST.UV.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Jupiter.Aurora.HST.UV.jpg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Anime Addict AA, Bapho, Borrow-188, ComputerHotline, FoeNyx, Friendlystar, Kurgus, Newone, RupertMillard, Ruslik0, Türelig, Überraschungsbilder, 6 anonyme Bearbeitungen

Datei:Sperma unter UV-Licht und ohne UV-Licht (Semen with and without Ultraviolet).JPG *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Sperma_unter_UV-Licht_und_ohne_UV-Licht_\(Semen_with_and_without_Ultraviolet\).JPG](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Sperma_unter_UV-Licht_und_ohne_UV-Licht_(Semen_with_and_without_Ultraviolet).JPG) *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* User:Daffman

Datei:UV-ontsmetting laminaire-vloeikast.JPG *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:UV-ontsmetting_laminaire-vloeikast.JPG *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Elipongo, Karelj, Newbie, Pieter Kuiper, TeleComNasSprVen, 2 anonyme Bearbeitungen

Datei:DNA UV mutation.svg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:DNA_UV_mutation.svg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Mouagip

Datei:LA2-Blitz-0424.jpg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:LA2-Blitz-0424.jpg> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* Kilom691, Natr, Origamiemensch

Datei:Halftoningcolor.svg *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Halftoningcolor.svg> *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Pbroks13, User:Slippens

Datei:Color icon violet.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Color_icon_violet.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* User:Booyabazooka

Datei:2005-03-28 015 Krokusy.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:2005-03-28_015_Krokusy.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Damid, Dcoetzee, Ies, TommyBee, Warburg, Wildfeuer

Datei:Violett (Lila2) 8 Juni 2003.JPG *Quelle:* [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Violett_\(Lila2\)_8_Juni_2003.JPG](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Violett_(Lila2)_8_Juni_2003.JPG) *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 3.0 *Bearbeiter:* User:Hedwig Storch

Datei:Eye_Line_of_sight.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Eye_Line_of_sight.jpg *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* LEONARDO DAVINCI

Datei:Gestalt ley de semejanza.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gestalt_ley_de_semejanza.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Eumedemito, KillOrDie, Paa, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Gestalt ley de cierre.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gestalt_ley_de_cierre.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Eumedemito, KillOrDie, Paa

Datei:Gestalt ley de proximidad.png *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Gestalt_ley_de_proximidad.png *Lizenz:* Public Domain *Bearbeiter:* Eumedemito, KillOrDie, Paa, 1 anonyme Bearbeitungen

Datei:Eye_movements_first_2_seconds.jpg *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Eye_movements_first_2_seconds.jpg *Lizenz:* Creative Commons Attribution-Sharealike 2.0 Germany *Bearbeiter:* Hans-Werner34

Datei:Red-YellowGreen-Blue LED spectra.gif *Quelle:* http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Red-YellowGreen-Blue_LED_spectra.gif *Lizenz:* GNU Free Documentation License *Bearbeiter:* Adoniscik, Dmitry G. Eno, Thorseth

Datei:Wellenlaenge.png *Quelle:* <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Wellenlaenge.png> *Lizenz:* unbekannt *Bearbeiter:* User:Schlurcher

Lizenz

Wichtiger Hinweis zu den Lizenzen

Die nachfolgenden Lizenzen bezieht sich auf den Artikeltext. Im Artikel gezeigte Bilder und Grafiken können unter einer anderen Lizenz stehen sowie von Autoren erstellt worden sein, die nicht in der Autorenlste erscheinen. Durch eine noch vorhandene technische Einschränkung werden die Lizenzinformationen für Bilder und Grafiken daher nicht angezeigt. An der Behebung dieser Einschränkung wird gearbeitet. Das PDF ist daher nur für den privaten Gebrauch bestimmt. Eine Weiterverbreitung kann eine Urheberrechtsverletzung bedeuten.

Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 Unported - Deed

Diese "Commons Deed" ist lediglich eine vereinfachte Zusammenfassung des rechtsverbindlichen Lizenzvertrages (http://de.wikipedia.org/wiki/Wikipedia:Lizenzbestimmungen_Commons_Attribution-ShareAlike_3.0_Unported) in allgemeinverständlicher Sprache. Sie dürfen:

- das Werk bzw. den Inhalt **vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen**
- **Abwandlungen und Bearbeitungen** des Werkes bzw. Inhaltes anfertigen

Zu den folgenden Bedingungen:

- **Namensnennung** — Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen.
- **Weitergabe unter gleichen Bedingungen** — Wenn Sie das lizenzierte Werk bzw. den lizenzierten Inhalt bearbeiten, abwandeln oder in anderer Weise erkennbar als Grundlage für eigenes Schaffen verwenden, dürfen Sie die daraufhin neu entstandenen Werke bzw. Inhalte nur unter Verwendung von Lizenzbedingungen weitergeben, die mit denen dieses Lizenzvertrages identisch, vergleichbar oder kompatibel sind.

Wobei gilt:

- **Verzichtserklärung** — Jede der vorgenannten Bedingungen kann aufgehoben werden, sofern Sie die ausdrückliche Einwilligung des Rechteinhabers dazu erhalten.
- **Sonstige Rechte** — Die Lizenz hat keinerlei Einfluss auf die folgenden Rechte:
 - Die gesetzlichen Schranken des Urheberrechts und sonstigen Befugnisse zur privaten Nutzung;
 - Das Urheberpersönlichkeitsrecht des Rechteinhabers;
 - Rechte anderer Personen, entweder am Lizenzgegenstand selber oder bezüglich seiner Verwendung, zum Beispiel Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen.
- **Hinweis** — Im Falle einer Verbreitung müssen Sie anderen alle Lizenzbedingungen mitteilen, die für dieses Werk gelten. Am einfachsten ist es, an entsprechender Stelle einen Link auf <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.de> einzubinden.

Haftungsbeschränkung
Die „Commons Deed“ ist kein Lizenzvertrag. Sie ist lediglich ein Referenztext, der den zugrundeliegenden Lizenzvertrag übersichtlich und in allgemeinverständlicher Sprache, aber auch stark vereinfacht wiedergibt. Die Deed selbst entfaltet keine juristische Wirkung und erscheint im eigentlichen Lizenzvertrag nicht.

GNU Free Documentation License

Version 1.2, November 2002

Copyright (C) 2000,2001,2002 Free Software Foundation, Inc.

51 Franklin St, Fifth Floor, Boston, MA 02110-1301 USA

Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies

of this license document, but changing it is not allowed.

0. PREAMBLE

The purpose of this License is to make a manual, textbook, or other functional and useful document "free" in the sense of freedom: to assure everyone the effective freedom to copy and redistribute it, with or without modifying it, either commercially or noncommercially. Secondly, this License preserves for the author and publisher a way to get credit for their work, while not being considered responsible for modifications made by others. This License is a kind of "copyleft", which means that derivative works of the document must themselves be free in the same sense. It complements the GNU General Public License, which is a copyleft license designed for free software.

We have designed this License in order to use it for manuals for free software, because free software needs free documentation: a free program should come with manuals providing the same freedoms that the software does. But this License is not limited to software manuals; it can be used for any textual work, regardless of subject matter or whether it is published as a printed book. We recommend this License principally for works whose purpose is instruction or reference.

1. APPLICABILITY AND DEFINITIONS

This License applies to any manual or other work, in any medium, that contains a notice placed by the copyright holder saying it can be distributed under the terms of this License. Such a notice grants a world-wide, royalty-free license, unlimited in duration, to use that work under the conditions stated herein. The "Document", below, refers to any such manual or work. Any member of the public is a licensee, and is addressed as "you". You accept the license if you copy, modify or distribute the work in a way requiring permission under copyright law.

A "Modified Version" of the Document means any work containing the Document or a portion of it, either copied verbatim, or with modifications and/or translated into another language.

A "Secondary Section" is a named appendix or a front-matter section of the Document that deals exclusively with the relationship of the publishers or authors of the Document to the Document's overall subject (or to related matters) and contains nothing that could fall directly within that overall subject. (Thus, if the Document is in part a textbook of mathematics, a Secondary Section may not explain any mathematics.) The relationship could be a matter of historical connection with the subject or with related matters, or of legal, commercial, philosophical, ethical or political position regarding them.

The "Invariant Sections" are certain Secondary Sections whose titles are designated, as being those of Invariant Sections, in the notice that says that the Document is released under this License. If a section does not fit the above definition of Secondary then it is not allowed to be designated as Invariant. The Document may contain zero Invariant Sections. If the Document does not identify any Invariant Sections then there are none.

The "Cover Texts" are certain short passages of text that are listed, as Front-Cover Texts or Back-Cover Texts, in the notice that says that the Document is released under this License. A Front-Cover Text may be at most 5 words, and a Back-Cover Text may be at most 25 words.

A "Transparent" copy of the Document means a machine-readable copy, represented in a format whose specification is available to the general public, that is suitable for revising the document straightforwardly with generic text editors or (for images composed of pixels) generic paint programs or (for drawings) some widely available drawing editor, and that is suitable for input to text formatters or for automatic translation to a variety of formats suitable for input to text formatters. A copy made in an otherwise Transparent file format whose markup, or absence of markup, has been arranged to thwart or discourage subsequent modification by readers is not Transparent. An image format is not Transparent if used for any substantial amount of text. A copy that is not "Transparent" is called "Opaque".

Examples of suitable formats for Transparent copies include plain ASCII without markup, Texinfo input format, LaTeX input format, SGML or XML using a publicly available DTD, and standard-conforming simple HTML, PostScript or PDF designed for human modification. Examples of transparent image formats include PNG, XCF and JPG. Opaque formats include proprietary formats that can be read and edited only by proprietary word processors, SGML or XML for which the DTD and/or processing tools are not generally available, and the machine-generated HTML, PostScript or PDF produced by some word processors for output purposes only.

The "Title Page" means, for a printed book, the title page itself, plus such following pages as are needed to hold, legibly, the material this License requires to appear in the title page. For works in formats which do not have any title page as such, "Title Page" means the text near the most prominent appearance of the work's title, preceding the beginning of the body of the text.

A section "Entitled XYZ" means a named subunit of the Document whose title either is precisely XYZ or contains XYZ in parentheses following text that translates XYZ in another language. (Here XYZ stands for a specific section name mentioned below, such as "Acknowledgements", "Dedications", "Endorsements", or "History".) To "Preserve the Title" of such a section when you modify the Document means that it remains a section entitled "XYZ" according to this definition.

The Document may include Warranty Disclaimers next to the notice which states that this License applies to the Document. These Warranty Disclaimers are considered to be included by reference in this License, but only as regards disclaiming warranties; any other implication that these Warranty Disclaimers may have is void and has no effect on the meaning of this License.

2. VERBATIM COPYING

You may copy and distribute the Document in any medium, either commercially or noncommercially, provided that this License, the copyright notices, and the license notice saying this License applies to the Document are reproduced in all copies, and that you add no other conditions whatsoever to those of this License. You may not use technical measures to obstruct or control the reading or further copying of the copies you make or distribute. However, you may accept compensation in exchange for copies. If you distribute a large enough number of copies you must also follow the conditions in section 3.

You may also lend copies, under the same conditions stated above, and you may publicly display copies.

3. COPYING IN QUANTITY

If you publish printed copies (or copies in media that commonly have printed covers) of the Document, numbering more than 100, and the Document's license notice requires Cover Texts, you must enclose the copies in covers that carry, clearly and legibly, all these Cover Texts: Front-Cover Texts on the front cover, and Back-Cover Texts on the back cover. Both covers must also clearly and legibly identify you as the publisher of these copies. The front cover must present the full title with all words of the title equally prominent and visible. You may add other material on the covers in addition. Copying with changes limited to the covers, as long as they preserve the title of the Document and satisfy these conditions, can be treated as verbatim copying in other respects.

If the required texts for either cover are too voluminous to fit legibly, you should put the first ones listed (as many as fit reasonably) on the actual cover, and continue the rest onto adjacent pages.

If you publish or distribute Opaque copies of the Document numbering more than 100, you must either include a machine-readable Transparent copy along with each Opaque copy, or state in or with each Opaque copy a computer-network location from which the general network-using public has access to download using public-standard network protocols a complete Transparent copy of the Document, free of added material. If you use the latter option, you must take reasonably prudent steps, when you begin distribution of Opaque copies in quantity, to ensure that this Transparent copy will remain thus accessible at the stated location until at least one year after the last time you distribute an Opaque copy (directly or through your agents or retailers) of that edition to the public.

It is requested, but not required, that you contact the authors of the Document well before redistributing any large number of copies, to give them a chance to provide you with an updated version of the Document.

4. MODIFICATIONS

You may copy and distribute a Modified Version of the Document under the conditions of sections 2 and 3 above, provided that you release the Modified Version under precisely this License, with the Modified Version filling the role of the Document, thus licensing distribution and modification of the Modified Version to whoever possesses a copy of it. In addition, you must do these things in the Modified Version:

- **A.** Use in the Title Page (and on the covers, if any) a title distinct from that of the Document, and from those of previous versions (which should, if there were any, be listed in the History section of the Document). You may use the same title as a previous version if the original publisher of that version gives permission.
- **B.** List on the Title Page, as authors, one or more persons or entities responsible for authorship of the modifications in the Modified Version, together with at least five of the principal authors of the Document (all of its principal authors, if it has fewer than five), unless they release you from this requirement.
- **C.** State on the Title page the name of the publisher of the Modified Version, as the publisher.
- **D.** Preserve all the copyright notices of the Document.
- **E.** Add an appropriate copyright notice for your modifications adjacent to the other copyright notices.
- **F.** Include, immediately after the copyright notices, a license notice giving the public permission to use the Modified Version under the terms of this License, in the form shown in the Addendum below.
- **G.** Preserve in that license notice the full lists of Invariant Sections and required Cover Texts given in the Document's license notice.
- **H.** Include an unaltered copy of this License.
- **I.** Preserve the section entitled "History", Preserve its Title, and add to it an item stating at least the title, year, new authors, and publisher of the Modified Version as given on the Title Page. If there is no section entitled "History" in the Document, create one stating the title, year, authors, and publisher of the Document as given on its Title Page, then add an item describing the Modified Version as stated in the previous sentence.
- **J.** Preserve the network location, if any, given in the Document for public access to a Transparent copy of the Document, and likewise the network locations given in the Document for previous versions it was based on. These may be placed in the "History" section. You may omit a network location for a work that was published at least four years before the Document itself, or if the original publisher of the version it refers to gives permission.
- **K.** For any section entitled "Acknowledgements" or "Dedications", Preserve the Title of the section, and preserve in the section all the substance and tone of each of the contributor acknowledgements and/or dedications given therein.
- **L.** Preserve all the Invariant Sections of the Document, unaltered in their text and in their titles. Section numbers or the equivalent are not considered part of the section titles.
- **M.** Delete any section entitled "Endorsements". Such a section may not be included in the Modified Version.
- **N.** Do not retitle any existing section to be entitled "Endorsements" or to conflict in title with any Invariant Section.
- **O.** Preserve any Warranty Disclaimers.

If the Modified Version includes new front-matter sections or appendices that qualify as Secondary Sections and contain no material copied from the Document, you may at your option designate some or all of these sections as invariant. To do this, add their titles to the list of Invariant Sections in the Modified Version's license notice. These titles must be distinct from any other section titles.

You may add a section entitled "Endorsements", provided it contains nothing but endorsements of your Modified Version by various parties—for example, statements of peer review or that the text has been approved by an organization as the authoritative definition of a standard.

You may add a passage of up to five words as a Front-Cover Text, and a passage of up to 25 words as a Back-Cover Text, to the end of the list of Cover Texts in the Modified Version. Only one passage of Front-Cover Text and one of Back-Cover Text may be added by (or through arrangements made by) any one entity. If the Document already includes a cover text for the same cover, previously added by you or by arrangement made by the same entity you are acting on behalf of, you may not add another; but you may replace the old one, on explicit permission from the previous publisher that added the old one.

The author(s) and publisher(s) of the Document do not by this License give permission to use their names for publicity for or to assert or imply endorsement of any Modified Version.

5. COMBINING DOCUMENTS

You may combine the Document with other documents released under this License, under the terms defined in section 4 above for modified versions, provided that you include in the combination all of the Invariant Sections of all of the original documents, unmodified, and list them all as Invariant Sections of your combined work in its license notice, and that you preserve all their Warranty Disclaimers.

The combined work must be licensed under the same license as the Document. If the combined work has multiple identical Invariant Sections with the same name but different contents, make the title of each such section unique by adding at the end of it, in parentheses, the name of the original author or publisher of that section if known, or else a unique number. Make the same adjustment to the section titles in the list of Invariant Sections in the license notice of the combined work.

In the combination, you must combine any sections Entitled "History" in the various original documents, forming one section Entitled "History"; likewise combine any sections Entitled "Acknowledgements", and any sections Entitled "Dedications". You must delete all sections Entitled "Endorsements".

6. COLLECTIONS OF DOCUMENTS

You may make a collection consisting of the Document and other documents released under this License, and replace the individual copies of this License in the various documents with a single copy that is included in the collection, provided that you follow the rules of this License for verbatim copying of each of the documents in all other respects.

You may extract a single document from such a collection, and distribute it individually under this License, provided you insert a copy of this License into the extracted document, and follow this License in all other respects regarding verbatim copying of that document.

7. AGGREGATION WITH INDEPENDENT WORKS

A compilation of the Document or its derivatives with other separate and independent documents or works, in or on a volume of a storage or distribution medium, is called an "aggregate" if the copyright resulting from the compilation is not used to limit the legal rights of the compilation's users beyond what the individual works permit. When the Document is included in an aggregate, this License does not apply to the other works in the aggregate which are not themselves derivative works of the Document.

If the Cover Text requirement of section 3 is applicable to these copies of the Document, then if the Document is less than one half of the entire aggregate, the Document's Cover Texts may be placed on covers that bracket the Document within the aggregate, or the electronic equivalent of covers if the Document is in electronic form. Otherwise they must appear on printed covers that bracket the whole aggregate.

8. TRANSLATION

Translation is considered a kind of modification, so you may distribute translations of the Document under the terms of section 4. Replacing Invariant Sections with translations requires special permission from their copyright holders, but you may include translations of some or all Invariant Sections in addition to the original versions of these Invariant Sections. You may include a translation of this License, and all the license notices in the Document, and any Warranty Disclaimers, provided that you also include the original English version of this License and the original versions of those notices and disclaimers. In case of a disagreement between the translation and the original version of this License or a notice or disclaimer, the original version will prevail.

If a section in the Document is Entitled "Acknowledgements", "Dedications", or "History", the requirement (section 4) to Preserve its Title (section 1) will typically require changing the actual title.

9. TERMINATION

You may not copy, modify, sublicense, or distribute the Document except as expressly provided for under this License. Any other attempt to copy, modify, sublicense or distribute the Document is void, and will automatically terminate your rights under this License. However, parties who have received copies, or rights, from you under this License will not have their licenses terminated so long as such parties remain in full compliance.

10. FUTURE REVISIONS OF THIS LICENSE

The Free Software Foundation may publish new, revised versions of the GNU Free Documentation License from time to time. Such new versions will be similar in spirit to the present version, but may differ in detail to address new problems or concerns. See <http://www.gnu.org/copyleft/>.

Each version of the License is given a distinguishing version number. If the Document specifies that a particular numbered version of this License "or any later version" applies to it, you have the option of following the terms and conditions either of that specified version or of any later version that has been published (not as a draft) by the Free Software Foundation. If the Document does not specify a version number of this License, you may choose any version ever published (not as a draft) by the Free Software Foundation.

ADDENDUM: How to use this License for your documents

To use this License in a document you have written, include a copy of the License in the document and put the following copyright and license notices just after the title page:

Copyright (c) YEAR YOUR NAME.

Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document

under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.2

or any later version published by the Free Software Foundation;

with no Invariant Sections, no Front-Cover Texts, and no Back-Cover Texts.

A copy of the license is included in the section entitled

"GNU Free Documentation License".

If you have Invariant Sections, Front-Cover Texts and Back-Cover Texts, replace the "with...Texts." line with this:

with the Invariant Sections being LIST THEIR TITLES, with the

Front-Cover Texts being LIST, and with the Back-Cover Texts being LIST.

If you have Invariant Sections without Cover Texts, or some other combination of the three, merge those two alternatives to suit the situation.

If your document contains nontrivial examples of program code, we recommend releasing these examples in parallel under your choice of free software license, such as the GNU General Public License, to permit their use in free software.