

Manuskript zur Vorlesung am 27.09.2007

# Farbenlehre

Dietrich Zawischa

Die Farbe wird von Licht „getragen“, aber die Farbempfindung entsteht erst in uns und unterliegt vielen verschiedenen Einflüssen, was die quantitative Beschreibung sehr erschwert. Ein Beispiel: ein hellgrünes Auto im Schein der untergehenden Sonne erscheint uns immer noch hellgrün, und wir nehmen auch wahr, daß es rötlich beleuchtet ist. Wenn wir durch eine Pappröhre schauen, so daß weder die Umgebung gesehen wird, noch, daß es sich um einen Teil des uns bekannten Autos handelt, würden wir den gleichen Farbreiz eher als Lachsrosa wahrnehmen.

## **Verschiedene Effekte, Farbkonstanz**

Von einem schwarz eingefärbten Blatt Papier im Sonnenlicht gelangt mehr Licht ins Auge als von einem weißen Papier im Schatten, trotzdem erscheint uns das eine schwarz, das andere weiß.

Es ist klar, daß die Intensität und Zusammensetzung des von einem Gegenstand ins Auge reflektierten Lichts ganz wesentlich von der Art der Beleuchtung abhängt; dieses jedoch fällt uns nur in Extremfällen deutlich auf (Alpenglühfen im Abendrot). Die Art der Beleuchtung wechselt im Tagesverlauf stark und hängt vom Wetter ab. Der Nutzen des Farbensehens liegt aber nicht im Wohlgefallen an einem Sonnenuntergang, einem schönen Regenbogen oder anderen farbprächtigen Phänomenen, sondern darin, daß wir Dinge durch ihre Farbe – und das bedeutet hier: die charakteristischen Eigenschaften des Remissionsvermögens – unterscheiden können, und

daß wir Dinge an ihrer Farbe wiedererkennen können, auch wenn sich die Beleuchtung ändert.

Das bedeutet: schon in der Netzhaut des Auges und erst recht dann im Gehirn werden von den Lichtreizen verursachten Erregungen einer aufwendigen Datenverarbeitung unterworfen, um Empfindungen zu erzeugen, die möglichst eng an das Remissionsvermögen der Gegenstände gekoppelt sind und möglichst unabhängig von der Beleuchtung und sonstigen Einflüssen („Farbkonstanz“).

Störende Einflüsse sind zahlreich vorhanden, und entsprechend vielfältig sind die Korrekturverfahren, die die optischen Daten „reinigen“, ehe sie ins Bewußtsein gelangen.

Das Einstellen des Auges auf die herrschende Beleuchtung nennt man Adaptation (Helligkeitsanpassung) und Farbumstimmung. Letztere entspricht dem, was in der Film-, Fernseh- und Fototechnik „Weißabgleich“ genannt wird.

Man beobachtet sowohl Angleichung benachbarter Farben (Assimilation) als auch subjektive Verstärkung der Unterschiede (Kontrastwirkung). Dabei unterscheidet man Simultan- und Sukzessivkontrast.

---

**Bilder S. 2–5:** Der Koffka-Ring<sup>1</sup> – Die bei den Bildern angegebenen Seitenzahlen beziehen sich auf die Datei farbe-bilder.pdf, die für die Betrachtung am Bildschirm vorgesehen ist.

---

**Bild S. 6, 7:** Koffka-Ring, farbige Variante

---

**Bilder S. 8–10:** Kontrastwirkung: Orange vor schwarzem Hintergrund und vor weißem Hintergrund

---

**Bild S. 12:** Beispiel 1 für Assimilation („Angleichung benachbarter Farben“, Überflutung): der Hintergrund erscheint unter dem schwarzen Muster dunkler als unter dem weißen.

---

<sup>1</sup><http://web.mit.edu/persci/gaz/gaz-teaching/index.html>

---

**Bilder S. 13, 14:** Beispiel 2 für Assimilation („Angleichung benachbarter Farben“, Überflutung): es wurden nur die auf der rechten Seite großflächig wiedergegebenen Farben verwendet.

---

**Bild S. 15:** Der Wasserfarbeneffekt. Erst vor wenigen Jahren wurde der „Wasserfarbeneffekt“ gefunden (B. Pinna et al. 2003, J.S. Werner et al. 2007). Die hellere der beiden Farben der Konturen scheint sich in die weiße Fläche hinein auszubreiten.)

---

**Bild S. 17:** Kontrastwirkung (Simultankontrast)

---

Eine graue Figur in rötlicher Umgebung wirkt in grüner Umgebung rötlich. Was gerne als optische Täuschung angesehen wird, zeigt eine Facette der Datenverarbeitung. Ursache der Täuschung ist, daß die Bilder flach sind. Wäre die rötliche Umgebung des grauen Quadrates dreidimensional, z.B. umgebende Wände, dann würde deren Widerschein den Farbreiz ins Rötliche verschieben. Diese Verschiebung wird abgeschätzt und rückgerechnet.

---

**Bilder S. 18–23:** Demonstration von Nachbildern. Text, Farbkreis und Fixationspunkt; Text, Weißer Stern auf gelbem Grund, Fixationspunkt

---

Nachbilder: Schaut man längere Zeit starr auf ein stark buntes Bild, z.B. den Mittelpunkt des Farbkreises und dann auf eine weiße Fläche, dann sieht man für einige Zeit das Bild in „Komplementärfarben“. Daß aber die Nachbilder nicht notwendig in den Komplementärfarben erscheinen, zeigt das überraschende Nachbild einer kleinen weißen Fläche auf großem gelben Hintergrund.

Sukzessivkontrast und Nachbilder hängen zusammen. Nachbilder kann man nur zum Teil durch Ermüdung der entsprechenden Rezeptoren erklären. Aber es ist auch eine *aktive* Leistung von Retina und Gehirn beteiligt. (Nach Blendung besteht die Leistung darin, das Nachbild zum Verschwinden zu bringen.)

Ein besonderer Nachbildeffekt soll hier noch vorgestellt werden, der bestimmt auf keinerlei Ermüdung beruht: der nach seiner Entdeckerin C. McCullough benannte Effekt der verknüpften Nachbilder (O.E. Eizner Favreau et al. 1976). Man betrachte zunächst ca. 10–15 Minuten lang das grün und purpurfarbene Streifenbild und dann das folgende. Man sollte dann die horizontal- und vertikal gestreiften Bereiche in etwas verschiedenen Farben sehen.

---

**Bilder S. 24–28:** Demonstration verknüpfter Nachbilder (McCullough-Effekt). Text, zwei purpur–grüne Streifenbilder, die abwechselnd betrachtet werden können, und zwei schwarz-weiße Streifenbilder.

---

Dieser subtile Effekt ist ein weiteres Beispiel dafür, daß zwischen Farbreiz im Auge und Farbempfindung ein beträchtlicher Aufwand an Datenverarbeitung liegt.

## Farbsysteme

Jetzt können wir versuchen, alle möglichen Farben in ein Schema einzuordnen.

---

**Bild S. 29, 30:** Text und Bild: Zwölfteiliger Farbkreis nach Johannes Itten (Schweizer Maler und Kunstpädagoge, lehrte am Staatlichen Bauhaus in Weimar)

---

Einen ersten Versuch in dieser Art unternimmt jedes Kind, das einen Kasten mit Buntstiften hat: es ordnet die bunten Farben in einer Reihe an – die Anordnung läßt sich zu einem Farbkreis schließen. Die Farben Weiß, Schwarz, Grau, Rosa, Braun, Olivgrün, wenn vorhanden, bleiben dann über. Die Reihe der bunten Farben hat Ähnlichkeit mit dem Spektralfarbenzug; darauf kommen wir noch zurück.

Sollen alle Farben – also auch Grau, Braun usw. – untergebracht werden, so ergibt sich ein dreidimensionales räumliches Gebilde.

Hierfür einige Beispiele; einen umfassenderen Überblick über die Geschichte der Farbsysteme findet man im Internet<sup>2</sup>.

Der Maler **Philipp Otto Runge** (1777–1810) ordnete die Gesamtheit der Farben in einer Kugel an, diese Kugel wurde durch Goethes Korrespondenz mit ihm weithin bekannt, bekannter als die Farbsysteme seiner Vorläufer Tobias Mayer (ein Prisma mit dreieckiger Grundfläche, 1758) und Johann Heinrich Lambert (Farbpyramide, 1772).

Der deutsche Chemiker **Wilhelm Ostwald** entwarf 1916 einen Farbkörper als Doppelkegel. Die intensivsten realisierbaren Farben (durch Pigmente angenähert) werden Vollfarben genannt und am äußeren Umfang des Doppelkegels angeordnet, wo wir den Farbkreis wiederfinden. Eine beliebige Oberflächenfarbe läßt sich nach Ostwald durch ihren Vollfarbanteil  $V$ , ihren Schwarzanteil  $S$  und ihren Weißanteil  $W$  kennzeichnen, wobei

$$V + S + W = 1 \quad (1)$$

gilt. Der Farbton selbst wird durch eine Nummer gekennzeichnet, (1 für Gelb, 5 für Rot 9 für Purpur (Magenta), 13 für Blau, 17 für Grünblau (Cyan), 21 für Grün, 24 ist dann Grünlichgelb und der Kreis schließt sich).

Zur Ermittlung der Ostwaldschen Farbmaßzahlen eignet sich der Farbkreis sehr gut.

---

**Bild S. 31, 32:** Ein Schnitt durch den Ostwaldschen Farbkörper (Doppelkegel)

---

**Bild: S. 33, 34** Derselbe Schnitt durch den Ostwaldschen Farbkörper ohne die schwarzen Zwischenräume: die Farbmuster scheinen durch die Kontrastwirkung ungleichmäßig gefärbt.

---

<sup>2</sup>z.B. <http://www.colorsystem.com>,  
<http://www.uni-mannheim.de/fakul/psycho/irtel/>

---

**Bild S. 35:** Farbkreis zur Bestimmung der Ostwaldschen Farbmaßzahlen
 

---

Gegenfarben nennt man ein Paar von Farben, die sich mit dem Kreis zu Grau, „Unbunt“, mischen lassen; sie sind so angeordnet, daß sie auf dem Farbkreis, der den Rand des Ostwaldschen Farbkörpers bildet, genau gegenüber liegen. Mischt man die beiden in den äußersten Feldern im Bild gezeigten Farben mit dem Farbkreis, so erhält man Grau, nicht, wie mancher vielleicht vermuten würde, Grün.

**Albert Henry Munsell**, ein amerikanischer Maler, veröffentlichte 1915 das „Munsell Book of Color“ (das seitdem mehrfach überarbeitet und neu aufgelegt wurde), in dem die Farben durch die drei Angaben

hue	...	Farbton
value	...	Helligkeit
chroma	...	Farbtiefe

gekennzeichnet sind. Die Auswahl der Proben erfolgte so, daß subjektiv gleiche Abstufungen von Helligkeit und Farbtiefe bei gleichem Farbton angestrebt wurde.

---

**Bild S. 36:** Zwei Seiten aus dem Munsell Book of Color
 

---

Die **DIN Farbkarte** stellt ein Ordnungssystem dar, das auf empirisch gefundenen und daher komplizierten Formeln für Helligkeit und Sättigung aufbaut, um gleichabständig wirkende Sättigungs- und Schattenreihen zu gewinnen (DIN 6164). Die DIN-Nummern 1 bis 24 für den Farbton erinnern noch an den Vorläufer, den Ostwaldschen Farbkörper.

Für spezielle Zwecke wurden noch weitere Farbmustersammlungen und Kennzeichnungsschemata entwickelt – HKS, NCS, Pantone, RAL u. a., auf die ich hier nicht eingehen kann.

Das wichtigste Ergebnis, das sich aus allen Farbschemata ablesen läßt, ist der Sachverhalt, daß ein dreidimensionaler Farbkörper alle möglichen Farben enthält. Daraus folgt, daß genau drei Maßzahlen eine Farbe vollständig festlegen. Ostwald kennzeichnet die Farben durch Nummern, zwischen denen auch Interpolation zulässig ist. Die Maßzahlen sind also z.B. die Farbnummer  $F$ , der Schwarzanteil  $S$  und der Weißanteil  $W$ .

So selbstverständlich dies scheint – man könnte sich auch etwas anderes vorstellen: ausgehend von vier Grundfarben, etwa Rot – Gelb – Grün – Blau, könnte der Farbraum ja auch vierdimensional sein. Wenn die „Mischung“ von Rot und Grün eine ganz neue Farbe, verschieden von Orange, Gelb oder Braun gäbe, und gleichermaßen Gelb und Blau zusammen etwas ganz anderes als Weiß, Grau oder Grün, dann ließen sich die bunten Farben nicht mehr in einem Farbkreis anordnen, sondern nur noch auf einer zweidimensionalen Fläche; dem Farbkreis würde eine Farbkugel entsprechen. Der Spektralfarbenzug wäre eine Kurve auf dieser Kugel, und die weitaus meisten bunten Farben wären unter den Spektralfarben nicht vertreten. So abwegig dies erscheinen mag: der Gesichtssinn der Vögel ist von dieser Art! Vögel sehen die Welt bunter als wir (T. H. Goldsmith 2007). Dabei sind wir Menschen gegenüber den meisten anderen Säugetieren noch im Vorteil: Für die meisten Säuger ist der Farbkörper zweidimensional, sieht etwa so aus wie der gezeigte Schnitt durch den Ostwaldschen Farbkörper, sie sehen die Welt nicht so bunt wie wir.

## Farbmessung

Das von einem Gegenstand reflektierte, durchgelassene oder von ihm selbst ausgesandte Licht, das ins Auge eintritt und eine Farbempfindung hervorruft, ist der **Farbreiz**. Zwar nehmen wir au-

ßer der Farbe auch noch wahr, ob der Gegenstand selbst leuchtet oder beleuchtet ist, ob er transparent oder lichtundurchlässig ist; wir bemerken, ob die Oberfläche matt oder glänzend ist, und dabei können verschiedene Arten Glanz unterschieden werden (Glasglanz, Metallglanz), aber man kann sich leicht überzeugen, daß all diese Attribute außer Farbe und Helligkeit nur durch das Zusammenwirken der Eindrücke von benachbarten Stellen des Gegenstandes und seiner Umgebung bestimmt werden: Betrachtet man eine Stelle, die so klein ist, daß sie völlig einheitlich erscheint, durch eine Blende, so bleiben nur die Merkmale Farbe und Helligkeit übrig.

Das Licht, also der Farbreiz, kann mit physikalischen Mitteln untersucht werden: Es kann durch ein Prisma in Anteile verschiedener Wellenlängen aufgespalten werden, und man kann messen, welche Energie pro Zeiteinheit in einem bestimmten Wellenlängenbereich transportiert wird.

Man unterteilt die Wellenlängenskala in kleine Abschnitte. Die Leistung (Energie/Zeiteinheit), die von der Strahlung in so einem kleinen Wellenlängenbereich in dem Intervall von  $\lambda - \Delta\lambda/2$  bis  $\lambda + \Delta\lambda/2$  in einen bestimmten Raumwinkelbereich hinein (z. B. in die Pupille) transportiert wird, nennen wir

$$\phi_\lambda \Delta\lambda \tag{2}$$

(Diese Leistung ist natürlich umso größer, je größer  $\Delta\lambda$  gewählt wird, daher schreiben wir  $\Delta\lambda$  als Faktor dazu.)

Kennen wir  $\phi_\lambda$  für alle Wellenlängen des sichtbaren Bereiches, also für jeden Abschnitt der Wellenlängenskala, so haben wir eine Funktion der Wellenlänge vorliegen, die spektrale Leistungsverteilung, die von der Physik her den Farbreiz vollständig bestimmt. Man nennt  $\phi_\lambda$  die **Farbreizfunktion**.

Man stellt fest, daß z. B. eine Verdopplung der Werte  $\phi_\lambda$  für alle Wellenlängen zwar die Helligkeit, nicht aber die Farbe einer Strahlungsquelle ändert; daher ist es üblich, diese Funktion willkürlich

zu normieren, d. h. mit einem beliebigen Zahlenfaktor zu multiplizieren, so daß man die Funktionen für Lichtquellen verschiedener Strahlungsleistung bequem in einem Diagramm unterbringen kann. (Noch größere Bequemlichkeit bedeutet dies für die Messung, da man sich auf eine Relativmessung beschränken kann, die viel einfacher ist als eine Absolutmessung).

Falls die untersuchte Strahlung direkt von einer Lichtquelle stammt, schreibt man statt  $\phi_\lambda$  lieber  $S_\lambda$  und nennt  $S_\lambda$  die **Strahlungsfunktion** der Lichtquelle.

Die naheliegende Vermutung, daß durch  $\phi_\lambda$  auch der **Farbeindruck** bestimmt ist, ist schnell widerlegt: durch Kontrast zur Umgebung, Anpassung des Auges an die herrschende Beleuchtung und nicht zuletzt durch die Verarbeitung der Daten im Gehirn sind erhebliche Unterschiede in der Farbempfindung möglich, wie zu Anfang an Beispielen gezeigt wurde.

Zumal sich Farbempfindungen ohnehin nicht (oder noch nicht) messen lassen, schaltet man sie bei der Farbmessung völlig aus, indem man nur nach der Unterscheidbarkeit oder Ununterscheidbarkeit eines Farbreizes von einem vorgegebenen anderen fragt und nicht nach dem Eindruck, den er hervorruft.

Damit die Form der Gegenstände und deren Umgebung den Beobachter nicht unbewußt beeinflusst, und um die Vergleichbarkeit optimal zu machen, werden die zu vergleichenden Farbreize als „freie Farben“ in den Hälften einer kreisförmigen Blende bestimmter Öffnung dargeboten (Aperturfarben), die Blende bietet den Anblick einer selbstleuchtenden Öffnung ohne Struktur. Besonders zur Untersuchung farbiger Oberflächen geeignet ist die „Maxwellsche Beobachtungsweise“: Wenn man etwas mit einer Lupe betrachtet, dann kann man die Abstände so wählen, daß die ganze Fläche der Lupe einheitlich farbig erscheint.

Für Farbmessungen und Farbvergleiche von Oberflächenfarben (Körperfarben) benötigt man Beleuchtungsstandards, denn bei der

Farbe, die so losgelöst vom Gegenstand erscheint, ist nun auch die Trennung von Gegenstands-„Farbe“ und Beleuchtungseinfluß nicht mehr möglich, die sonst zumeist unbewußt und mit erstaunlicher Genauigkeit vorgenommen wird, und das Experiment reduziert sich auf den Vergleich zweier durch ihre spektralen Verteilungen gegebener Lichtströme, zweier Farbreize.

Stimmen zwei Farbreize in ihren spektralen Verteilungen überein, also  $\phi_{1,\lambda} = \phi_{2,\lambda}$ , so erscheinen sie unbedingt gleich (allen Beobachtern!), man spricht in diesem Fall von **Isomerie**. Die Farbreize können aber auch gleich erscheinen, wenn die Verteilungsfunktionen verschieden sind. Diese Übereinstimmung nennt man **Metamerie** oder bedingte Gleichheit.

Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, führt man die Wertigkeit  $\mathbf{V}$  eines Farbreizes in Hinblick auf den Farbsinn des Beobachters ein. Erscheinen einem Beobachter zwei Farbreize gleich, so schreiben wir

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_2 \quad (3)$$

d. h. die **Wertigkeiten**, Farbvalenzen oder kurz **Valenzen** der beiden Farbreize sind gleich, und über die Farbreizfunktion selbst sagt diese Gleichung nichts aus. Obwohl farbtüchtige Beobachter in ihren Urteilen im großen und ganzen übereinstimmen, gilt diese Gleichung streng genommen zunächst nur in Hinblick auf den einen Beobachter.

Betrachten wir eine Versuchsanordnung: die linke Hälfte des Gesichtsfeldes soll von einer Lampe durch ein Farbfilter beleuchtet werden, und diese Farbe soll auf der rechten Hälfte reproduziert werden. Dazu stehen drei Projektoren mit Farbfiltern zur Verfügung, deren Helligkeit regelbar ist. Durch Überlagerung (Addition) der drei Farbreize mit verschiedenen Gewichten kann man Mischfarben erzeugen. Wählt man als Basisvalenzen Rot, Grün und Blau, alle drei möglichst gesättigt, kann man in vielen Fällen Übereinstim-

mung erreichen. Das heißt, und dies ist eine fundamentale experimentelle Erkenntnis, die Farben (alle Farbtöne!) können als Mischung aus drei verschiedenen, fest vorgegebenen Farbreizen dargestellt werden.

---

**Bild S. 37:** Makroaufnahme eines Computerbildschirms.

---

Wir schreiben die Übereinstimmung der Bildhälften als Gleichung für die Farbvalenzen:

$$\mathbf{V} = \mathbf{RR} + \mathbf{GG} + \mathbf{BB} \quad (4)$$

Die fett gedruckten Großbuchstaben stehen für Farbvalenzen, die Buchstaben  $R, G, B$  (**Farbmaßzahlen**) für die in beliebigen Einheiten gemessenen Mengen der Grundvalenzen  $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$ .

Es kann allerdings vorkommen, z. B. wenn die Probelichtquelle eine sehr intensive Farbe hat, daß mit der gegebenen Anordnung keine Anpassung der beiden Felder aneinander erreicht werden kann, daß etwa ein tiefes Blaugrün aus den gewählten Farben Rot, Grün und Blau nicht gemischt werden kann, die Mischfarbe immer etwas weißlicher erscheint. Wenn der Farbvergleich der Messung und nicht der Reproduktion dient, kann man sich in diesem Fall behelfen, indem man etwa die rote Lichtquelle in der Versuchsanordnung auf die andere Seite nimmt. Wenn dann Gleichheit erreicht werden kann, entsprechend

$$\mathbf{V} + \bar{\mathbf{R}}\mathbf{R} = \mathbf{GG} + \mathbf{BB} \quad (5)$$

so können wir dies schreiben als

$$\mathbf{V} = -\bar{\mathbf{R}}\mathbf{R} + \mathbf{GG} + \mathbf{BB}, \quad (6)$$

wobei jetzt negative Mengen eines Farbreizes auftreten. Für eine praktische Realisierung einer Farbwertgleichung sind die Terme so

umzustellen, daß nur positive Gewichtungsfaktoren auftreten, und den beiden Seiten der Gleichung entsprechen dann mögliche Beleuchtungen der beiden Gesichtsfeldhälften.

Läßt man negative Beimischungen zu, dann gilt Gleichung (4) allgemein unter der Voraussetzung, daß nicht eine der drei Vergleichsfarben durch die beiden anderen nachgemischt werden kann. Dies ist das *1. Graßmannsche Gesetz*, das man so formulieren kann: Von vier Farben läßt sich immer eine als Überlagerung der anderen darstellen (H. Graßmann 1853).

Weiters stellt man fest: Hat man eine metamere Übereinstimmung, so bleibt diese Übereinstimmung erhalten, wenn die Helligkeit von beiden im gleichen Maße erhöht oder verringert wird, es gilt also

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_2 \quad \Rightarrow \quad a\mathbf{V}_1 = a\mathbf{V}_2 \quad (7)$$

zumindest innerhalb gewisser Grenzen. (Wenn man die Helligkeit soweit vermindert, daß man in den Bereich des Nachtsehens kommt, kann die Übereinstimmung aufhören.)

Die Gleichheit zweier Farben bleibt auch bestehen, wenn beiden die gleiche Farbe additiv überlagert wird:

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_2 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{V}_1 + \mathbf{U} = \mathbf{V}_2 + \mathbf{U} \quad (8)$$

und es gilt auch

$$\mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_2, \mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_2 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{U}_1 + \mathbf{V}_1 = \mathbf{U}_2 + \mathbf{V}_2 \quad (9)$$

(3. *Graßmannsches Gesetz*)

Haben wir für  $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$  die Maßzahlen  $R_1, G_1, B_1$  bzw.  $R_2, G_2, B_2$  ermittelt,

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_1 &= R_1\mathbf{R} + G_1\mathbf{G} + B_1\mathbf{B} \\ \mathbf{V}_2 &= R_2\mathbf{R} + G_2\mathbf{G} + B_2\mathbf{B} \end{aligned} \quad (10)$$

dann gilt auch

$$\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 = (R_1 + R_2)\mathbf{R} + (G_1 + G_2)\mathbf{G} + (B_1 + B_2)\mathbf{B}. \quad (11)$$

Es besteht also ein linearer Zusammenhang zwischen den Farbreizen und den Farbmaßzahlen, und es gelten für die Addition von metameren Farbvalenzen die gleichen Gesetze wie für die Addition von Vektoren. Daher kann man jeden Farbwert als Vektor in einem Farbenraum darstellen, und dieser Farbenraum ist dreidimensional, d. h. es gibt nur drei linear unabhängige Basisvektoren, genau wie in dem physikalischen Raum unserer Anschauung. Damit haben wir die Dreidimensionalität des Farb-Empfindungs-Raumes in der Dreidimensionalität des Raumes der Farbwerte wiedergefunden.

In der Darstellung durch Vektoren unterscheiden sich Farben, die durch Vektoren in der gleichen Richtung gegeben sind, nur durch ihre Helligkeit; die **Farbart** ist allein durch die Richtung des Vektors gegeben.

Bis jetzt ist nichts über die Einheiten gesagt worden, in denen die Farbvalenzen gemessen werden; man kann sie willkürlich festlegen. Es ist üblich, diese Festlegung wie folgt zu treffen: Je eine drittel Einheit der Primärvalenzen Rot, Grün und Blau (Blauviolett) addiert sollen eine Einheit Weiß ergeben, wobei als Weiß die Farbvalenz des energiegelichen Spektrums  $\phi_\lambda = \text{const}$  gewählt wird. Die absolute Größe der Einheiten ist wegen Gl. (7) unerheblich, es wird auf diese Weise nur die relative Größe fixiert.

$$\frac{1}{3}\mathbf{R} + \frac{1}{3}\mathbf{G} + \frac{1}{3}\mathbf{B} = \mathbf{E} \quad (12)$$

Die in diesen Einheiten gemessenen Größen  $R$ ,  $G$ ,  $B$  nennt man die **trichromatischen Maßzahlen**.

Das für die additive Farbmischung maßgebliche Gewicht einer Farbvalenz, die Zahl der trichromatischen Einheiten, erhält man als

Summe der Gewichte der Komponenten: Zwei Einheiten der Farbe A plus drei Einheiten der Farbe B ergeben fünf Einheiten der Mischfarbe.

Da die Helligkeit vielfach weniger interessiert als die Farbart, geht man von der dreidimensionalen Darstellung zur einfacheren zweidimensionalen über, indem man als Farbdiaagramm die Einheitsebene  $R + G + B = 1$  zeichnet, wobei die Farbart durch die Durchstoßpunkte der Farbvalenzvektoren gegeben ist. (Abb. 1.)

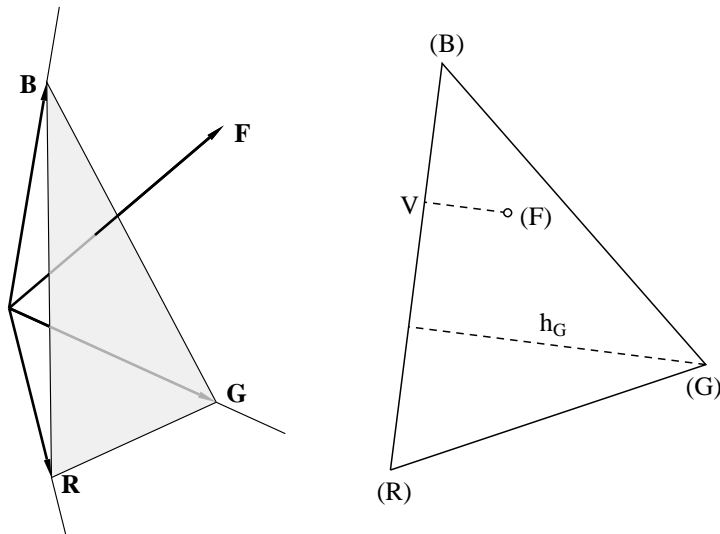


Abbildung 1: Links: Das Farbdreieck im Farbraum: Die Farbart der als Vektorpfeil eingezeichneten Farbvalenz ist durch den Durchstoßpunkt des Farbvektors durch die Einheitsebene gegeben. Rechts: Die Einheitsebene mit dem eingezeichneten Durchstoßpunkt (F) der Farbvalenz **F**.

Aus  $R$ ,  $G$ ,  $B$  berechnet man die Koordinaten des Durchstoß-

punktes zu

$$r = \frac{R}{R + G + B}, \quad g = \frac{G}{R + G + B}, \quad b = \frac{B}{R + G + B} \quad (13)$$

und es ist natürlich  $r + g + b = 1$ , so daß nur zwei der Koordinaten (Farbwertanteile) angegeben werden müssen. Für einen eingezeichneten Punkt lassen sich diese Koordinaten unmittelbar dem Farbdreieck entnehmen als Abstände des Punktes von den Dreiecksseiten, wobei die Einheiten durch die jeweilige Höhe des Dreiecks gegeben sind (z. B.  $g = (\text{Abstand F-V})/h_G$ ).

Die Form des Dreiecks ist im übrigen willkürlich; da auch die Winkel zwischen den Achsen in Abb. 1 keine Bedeutung haben, kann man das Farbdreieck rechtwinklig oder gleichseitig zeichnen, ohne an den obigen Beziehungen etwas zu ändern.

Aus der Konstruktion folgt, daß die Überlagerung zweier Farben im Farbdreieck durch einen Punkt auf der Verbindungslinie der beiden Ausgangsfarbart dargestellt wird, und die Abstände verhalten sich umgekehrt wie die Mengen (in trichromatischen Einheiten) der Komponenten (Hebelgesetz), Abb. 2.

Bemerkenswert ist der Helligkeitsunterschied der Primärvalenzen **R**, **G**, **B**. Bei Verwendung von spektralreinem Licht der Wellenlängen  $\lambda_R = 700 \text{ nm}$ ,  $\lambda_G = 546,1 \text{ nm}$ ,  $\lambda_B = 435,8 \text{ nm}$ <sup>3</sup> für die primären Farbreize erscheint eine Einheit Rot etwa 15 bis 20 mal so hell wie eine Einheit Blau, eine Einheit Grün wiederum vier bis fünf mal so hell wie Rot, d. h. etwa viereinhalb Einheiten **R** erscheinen erst so hell wie **G**. Allerdings ist der Vergleich der Helligkeiten von verschiedenen Farben problematisch, und so sind die den genormten Lichtquellen zugeordneten Helligkeitsbeiwerte (Leuchtdichtebeiwerte) als aus der Helligkeitsempfindungskurve  $V_\lambda$  entnommene Zahlen und nicht als mit derart exzessiver Genauigkeit gemessene Werte zu verstehen.

---

<sup>3</sup>Normfarbreize für die Farbmessung nach DIN 5033

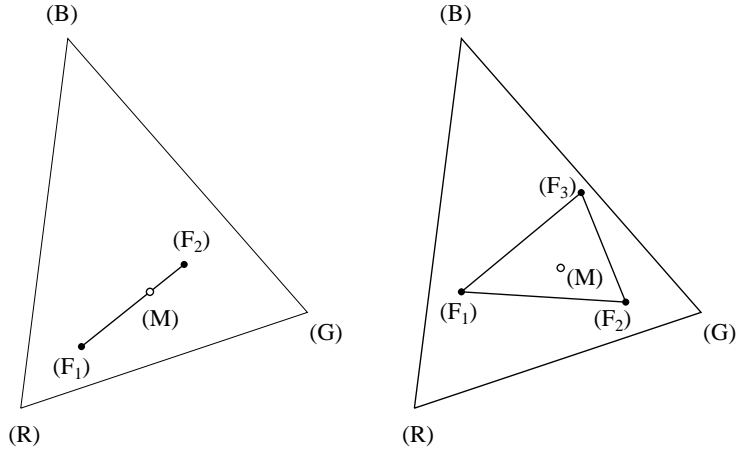


Abbildung 2: Für die additive Mischung von Farben gilt im Farbdreieck der Hebel- oder Schwerpunktssatz: Denkt man sich an den Farborten Gewichte angebracht, die durch die Einheitenzahlen der Farben  $F_1, F_2, \dots$  gegeben sind, so befindet sich der Farbortpunkt der Mischfarbe genau im gemeinsamen Schwerpunkt dieser Gewichte.

Die Helligkeitsempfindungskurve  $V_\lambda$  ist aus Meßreihen an einer größeren Zahl von farbnormalsichtigen Versuchspersonen gewonnen worden und kann als repräsentativ gelten („Normalbeobachter“). Für die oben angegebenen Wellenlängen sind die Leuchtdichtebeiwerte

$$l_R = 1, \quad l_G = 4,5907, \quad l_B = 0,0601 \quad (14)$$

damit errechnet man die Helligkeit (Leuchtdichte) eines farbigen Lichtes zu

$$cL = l_R R + l_G G + l_B B \quad (15)$$

Dabei ist  $c$  ein Proportionalitätsfaktor, über den wir noch so verfügen können, daß sich  $L$  in den gewünschten Einheiten ergibt, z. B. in  $\text{cd}/\text{m}^2$ , Candela pro Quadratmeter.

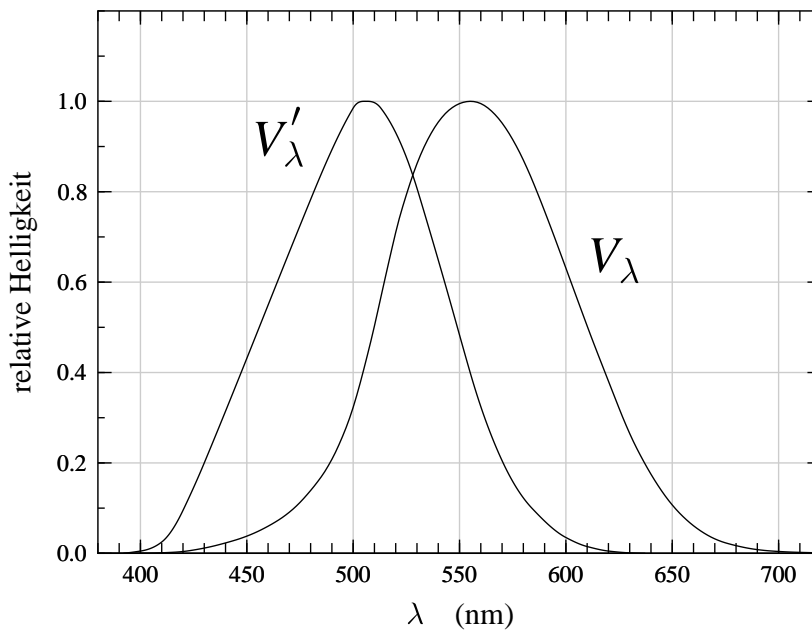


Abbildung 3: Die relative Helligkeitsempfindlichkeit für Tages- und Nachtsehen

---

**Bild S. 38:** Die Helligkeitsempfindungskurven für Tages- und Nachtsehen.

---

Diese Beziehung beruht auf der Voraussetzung, daß sich die Helligkeiten additiv verhalten (Abneysches Gesetz), dies gehört gleichsam zur Definition der Helligkeit.

Im übrigen stehen die Energien, die die drei Lichtquellen je Zeiteinheit aussenden, wieder in einem anderen Verhältnis: Es ist, für je

eine trichromatische Einheit

$$S_R : S_G : S_B = 72.0962 : 1.3791 : 1 \quad (16)$$

## Berechnung der Farbmaßzahlen

Die trichromatischen Maßzahlen für spektralreines Licht sind von besonderer Bedeutung: Für Strahlung der Wellenlängen  $\lambda$  (Farbreiz  $q_\lambda$ ) erhält man die Maßzahlen  $\bar{r}_\lambda$ ,  $\bar{g}_\lambda$ ,  $\bar{b}_\lambda$ , die **spektrale Farbwerte** genannt werden. Variiert man  $\lambda$ , wobei die Strahlungsintensität festgehalten wird oder auf eine Einheit (z. B. 1 Watt/m<sup>2</sup>) zurückgerechnet wird, dann stellen  $\bar{r}_\lambda$ ,  $\bar{g}_\lambda$  und  $\bar{b}_\lambda$  Funktionen von  $\lambda$  dar, die **Spektralwertkurven** (Abb. 4).

Sind die Spektralwertkurven bekannt, dann kann man die Farbmaßzahlen für einen durch die Funktion  $\phi_\lambda$  bestimmten Farbreiz berechnen.

Dazu denken wir uns den sichtbaren Wellenlängenbereich wieder in kleine Intervalle der Größe  $\Delta\lambda$  zerlegt. Wäre die Intensität in einem herausgegriffenen Teilbereich eine Einheit groß, so wären die trichromatischen Koordinaten für diesen Teilbereich  $\bar{r}_\lambda$ ,  $\bar{g}_\lambda$ ,  $\bar{b}_\lambda$ . Die Maßzahlen für einen Teilbereich der Intensität  $\phi_\lambda \Delta\lambda$  sind daher

$$\bar{r}_\lambda \phi_\lambda \Delta\lambda, \quad \bar{g}_\lambda \phi_\lambda \Delta\lambda, \quad \bar{b}_\lambda \phi_\lambda \Delta\lambda. \quad (17)$$

Nun haben wir über alle Teilbereiche aufzusummieren und erhalten

$$R = \sum_{\lambda} \bar{r}_\lambda \phi_\lambda \Delta\lambda, \quad G = \sum_{\lambda} \bar{g}_\lambda \phi_\lambda \Delta\lambda, \quad B = \sum_{\lambda} \bar{b}_\lambda \phi_\lambda \Delta\lambda. \quad (18)$$

## Der Normalbeobachter

Es ist leicht, von einem Satz Primärvalenzen auf einen anderen unzurechnen, was z. B. für den Vergleich verschiedener Messungen

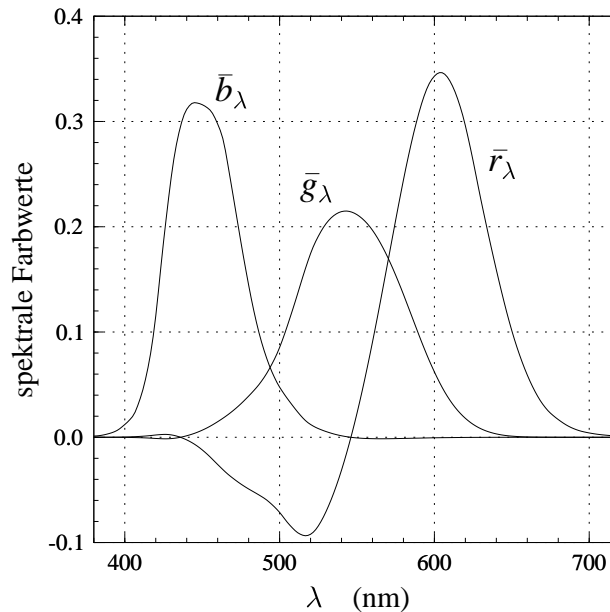


Abbildung 4: Die Farbwerte der Spektralfarben für reelle, spektralreine Grundfarben (nach DIN 5033):  $\lambda_R = 700 \text{ nm}$ ,  $\lambda_G = 546,1 \text{ nm}$ ,  $\lambda_B = 435,8 \text{ nm}$ .

---

**Bild S. 39:** Die spektralen Farbwerte bei Verwendung von spektralreinem Licht der Wellenlängen  $\lambda_R = 700 \text{ nm}$ ,  $\lambda_G = 546,1 \text{ nm}$ ,  $\lambda_B = 435,8 \text{ nm}$  für die primären Farbreize

---

wichtig ist. Dies ist durch die geometrische Interpretation der Farbvalenzen als Vektoren besonders anschaulich.

Da die drei Kurven  $\bar{r}_\lambda$ ,  $\bar{g}_\lambda$ ,  $\bar{b}_\lambda$  die Berechnung der Farbvalenz für jeden Farbreiz gestatten, enthalten sie die gesamte Information über die Farbwahrnehmung des Beobachters (Farbwahrnehmung

im Sinn von Unterscheidungsfähigkeit, von Empfindungen soll zunächst nicht die Rede sein). Bei noch so sorgfältiger Messung werden allerdings die entsprechenden Kurven zweier verschiedener Versuchspersonen kaum je völlig übereinstimmen, sondern es ergeben sich mehr oder weniger deutliche Unterschiede. Selbst für ein und dieselbe Person hängen die Ergebnisse von der Größe (Winkelausdehnung) des Testfeldes ab.

Diese für Standardisierung und eindeutige Festlegung von Toleranzen ungünstige Situation wurde 1931 von der Internationalen Beleuchtungskommission (CIE, Commission Internationale de l'Éclairage) behoben, indem ein fiktiver Normalbeobachter (oder Normbeobachter) eingeführt wurde: Als Grundlage dienten Messungen von Guild (1931/32) und von Wright (1928/29), die mit Farbreizen der schon erwähnten Wellenlängen von  $\lambda_R = 700 \text{ nm}$ ,  $\lambda_G = 546,1 \text{ nm}$ ,  $\lambda_B = 435,8 \text{ nm}$  bei einem Öffnungswinkel von  $2^\circ$  gewonnen worden waren, und deren Mittelwerte dann als Spektralwertkurven für den Normalbeobachter definiert wurden. Die Kurven sind in Abb. 4 dargestellt. Spätere Wiederholungen der Messungen mit verfeinerter Meßtechnik (Stiles 1955) haben die früheren Ergebnisse bestätigt, die Kurven können also als repräsentativ gelten.

Die einfache Umrechnungsmöglichkeit zwischen Primärvalenzen hat die Internationale Beleuchtungskommission 1931 bewogen, für die Erfassung und graphische Darstellung von Daten Primärvalenzen mit besonderen Eigenschaften anzugeben und die entsprechenden Spektralwertfunktionen in Tabellenform als Norm festzulegen. Die neuen Primärvalenzen **X**, **Y**, **Z** wurden so gewählt, daß die Maßzahlen  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  für reelle Farben nicht negativ werden, d. h. in der Einheitsebene liegt der Spektralfarbenzug innerhalb des Dreiecks  $XYZ$ , und das bedeutet natürlich auch, daß die Valenzen **X**, **Y**, **Z** selbst nicht realisierbar sind, sie liefern nur das Koordinatensystem für eine besonders bequeme Darstellung.

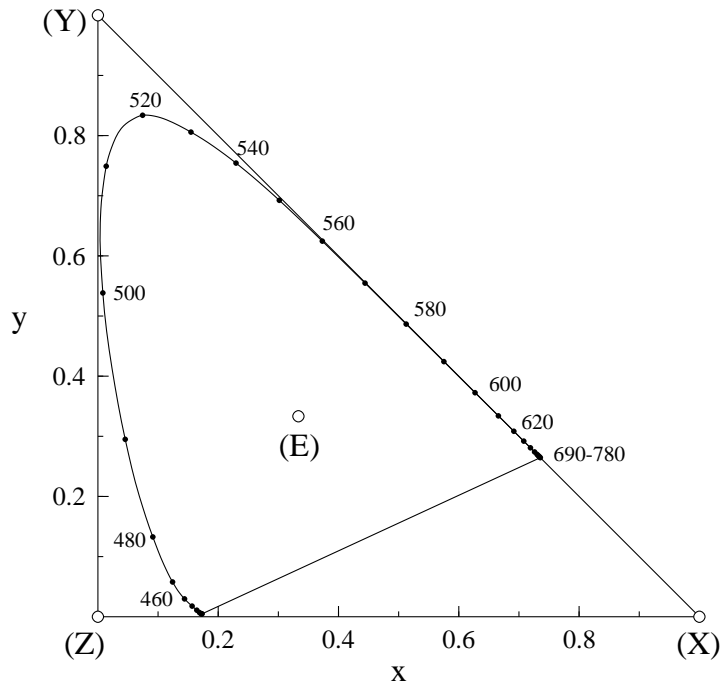


Abbildung 5: Die Normfarbtafel, aufbauend auf den virtuellen Farbvalenzen  $X$ ,  $Y$  und  $Z$ . Entlang des Spektralfarbenzuges sind die Wellenlängen in nm angegeben.

**Bild S. 40:** Normfarbtafel mit dem Spektralfarbenzug, der von der Purpurlinie geschlossen wird, und eingezeichnetem Farbort (E) des energiegleichen Spektrums.

Gl. (15) gibt die Helligkeit für jeden Vektor im Farbraum an. Setzen wir  $L = 0$ , dann ist

$$0 = l_R R + l_G G + l_B B \quad (19)$$

die Gleichung einer Ebene im Farbraum, der Ort aller Valenzen mit Helligkeit Null. Die Primärvalenzen  $\mathbf{X}$  und  $\mathbf{Z}$  wurden in diese Ebene gelegt, daher gilt  $l_X = l_Z = 0$ . Für die Valenz  $\mathbf{Y}$  wurde als Spektralwertkurve die Helligkeitsempfindungskurve  $V_\lambda$  angenommen, denn unter der Voraussetzung, daß Helligkeiten additiv sind, kann man diese Kurve als Überlagerung der Spektralwertkurven  $\bar{r}_\lambda, \bar{g}_\lambda, \bar{b}_\lambda$  ausrechnen, entsprechend Gl. (15). Somit wird die Koordinate  $Y$  proportional zur Helligkeit.

Da die Form des Farbdreiecks – wie schon besprochen – willkürlich ist, wählt man üblicherweise die bequemste Form, nämlich ein rechtwinklig gleichschenkliges Dreieck, Abb. 5, die den Vorteil hat, daß man normales Millimeterpapier verwenden kann.

---

**Bild S. 41:** Normfarbtafel mit den durch die sRGB-Primärvalenzen<sup>4</sup> darstellbaren Bildschirmfarben

---

Die Berechnung der Farbmaßzahlen in bezug auf  $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$  geschieht völlig analog zu den Gleichungen (18) mit Hilfe der Spektralwertkurven<sup>5</sup>  $\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda$  und  $\bar{z}_\lambda$ , Abb. 6: Aus der spektralen Leistungs-Verteilungsfunktion (Farbreizfunktion) berechnet man die trichromatischen Maßzahlen entsprechend

$$X = k \sum_{\lambda} \bar{x}_{\lambda} \phi_{\lambda} \Delta \lambda, \quad Y = k \sum_{\lambda} \bar{y}_{\lambda} \phi_{\lambda} \Delta \lambda, \quad Z = k \sum_{\lambda} \bar{z}_{\lambda} \phi_{\lambda} \Delta \lambda. \quad (20)$$

Da die Funktionen  $\bar{x}_\lambda, \bar{y}_\lambda, \bar{z}_\lambda$  willkürlich normiert sind (so daß das Maximum von  $\bar{y}_\lambda$  gleich 1 ist), haben wir hier einen Proportionalitätsfaktor vor die Summe gestellt.

Bei der Wellenlänge  $\lambda = 555 \text{ nm}$  entspricht einem Energiestrom von 1 W (Watt) ein Lichtstrom von 683 lm (Lumen). Diese

---

<sup>4</sup><http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB>

<sup>5</sup>Tabellen im Intzernet z. B. unter <http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/index.htm>

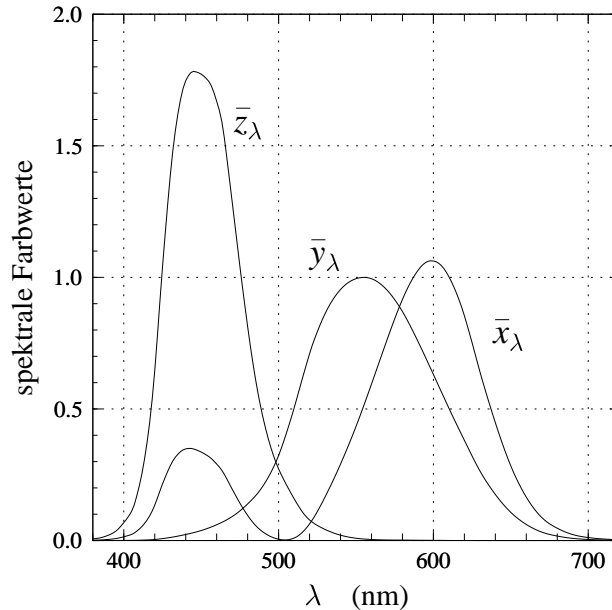


Abbildung 6: Die Norm-Spektralwertkurven für 2°-Gesichtsfeld

**Bild S. 42:** Die Spektralwertkurven für die Primärvalenzen **X**, **Y** und **Z**

Zahl berechnet man aus der Definition der Einheit des Lichtstromes mit Hilfe der Schwarzkörperstrahlung und der Planckschen Formel. Wählt man also  $k = K_m = 683 \text{ lm/W}$ , so gibt  $Y$  den Gesamtlichtstrom in Lumen an, wenn für  $\phi_\lambda$  der Energiefluß pro Wellenlängeneinheit eingesetzt wird.

Die Farbwertanteile ergeben sich zu

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}; \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}; \quad z = 1 - x - y. \quad (21)$$

Die Beziehung für die Helligkeit  $L = l_x X + l_y Y + l_z Z$  wird wegen  $l_x = l_z = 0, l_y = 1$  zu

$$L = Y. \quad (22)$$

Die eben besprochenen Spektralwertkurven wurden für  $2^\circ$  Gesichtsfeldöffnungswinkel bestimmt und sind bis etwa  $4^\circ$  Öffnungswinkel gültig ( $2^\circ$  Öffnungswinkel entspricht einer Scheibe von 1 cm Durchmesser aus 29 cm Entfernung betrachtet). Für die Fälle, wo es auf die Beurteilung größerer Gesichtsfelder ankommt, wurden 1964, basierend auf Messungen von Speranskaya (1959) und Stiles (1955), Kurven und Valenzen für  $10^\circ$  Öffnungswinkel festgelegt, die zur Unterscheidung von den anderen mit dem Index 10 versehen werden, also  $X_{10}, \dots, \bar{x}_{10\lambda}, X_{10}$  etc. Allerdings ist Übereinstimmung von  $Y_{10}$  mit der Helligkeit zunächst nicht vorauszusetzen, da eine entsprechende Helligkeitsempfindungskurve noch nicht festgelegt ist (DIN 5031 und DIN 5033).

## Körperfarben und Farbfilter

Bei dem bisher über Farbmessung gesagten sind wir immer von der Farbreizfunktion  $\phi_\lambda$  ausgegangen, also von der spektralen Zusammensetzung des Lichts, das in die Pupille eintritt. Falls  $\phi_\lambda$  durch die Emission einer Lampe oder sonstigen Lichtquelle bestimmt ist, oder durch eine als Einheit aufgefaßte Kombination Lampe-Filter, dann ist alles im vorigen Abschnitt Gesagte unmittelbar anwendbar. Nun begegnen wir aber Farben überwiegend an farbigen Gegenständen, und dementsprechend bezieht sich die Farbmessung in den meisten Fällen auf Farben von Oberflächen (Aufsichts-, Oberflächen- oder Körperfarben), oder von Filtern, wobei die Farbreizfunktion außer durch Remissions- (bzw. Transmissions-) Vermögen des Körpers durch die Beleuchtungsart wesentlich mitbestimmt wird. Da man die Einflüsse beider auf die Farbe nicht tren-

nen kann, muß man die Beleuchtungsart festlegen, um verschiedene Messungen vergleichen zu können. Von der CIE wurden drei Standardlichtquellen A, B, C vorgeschlagen, die so gewählt sind, daß sie „Glühlampenlicht“, „Sonnenlicht am Mittag“, und „Tageslicht bei bedecktem Himmel“ nahekommen. Verteilungsfunktionen für weitere Lichtarten wurden genormt: D<sub>55</sub>, D<sub>65</sub> und D<sub>75</sub>. Der Buchstabe D steht für daylight, Tageslicht. D<sub>65</sub> entspricht mittlerem Tageslicht der Farbtemperatur 6504 K. Die Lichtquelle A wird realisiert durch eine 500 W Wolframfadenlampe, die bei einer Farbtemperatur von 2856 K betrieben wird; B und C sind A mit Filtern.

Die optischen Eigenschaften einer Körperoberfläche, soweit sie für die Farbigkeit relevant sind, werden durch den **Remissionsfaktor** (Remissionsgrad oder kurz **Remission**) beschrieben. Dieser gibt an, wieviel Licht von einer Fläche im Verhältnis zu einer ideal mattweißen unter den gleichen Bedingungen zum Beobachter gelangt, und zwar als Funktion der Wellenlänge:

$$\beta_{\lambda} = L/L_{\text{weiß}} \quad (23)$$

bei Beleuchtung mit Licht der Wellenlänge  $\lambda$ .

Für eine ideal mattweiße Fläche, die nicht absorbiert und unter allen Beobachtungswinkeln gleich hell erscheint, ist definitionsgemäß

$$\beta_{\lambda} = 1. \quad (24)$$

Was im folgenden über Aufsichtsfarben gesagt wird, gilt auch für Farbfilter, wobei nur das Remissionsvermögen  $\beta_{\lambda}$  durch das Transmissionsvermögen  $\tau_{\lambda}$  (**Transmission**, Durchlässigkeit) zu ersetzen ist.

Die beleuchtende Lichtart sei durch die spektrale Verteilungsfunktion  $S_{\lambda}$  gegeben, wobei  $S_{\lambda}\Delta\lambda$  dem Energiefluß von der Lichtquelle im Bereich der Wellenlängen von  $\lambda - \Delta\lambda/2$  bis  $\lambda + \Delta\lambda/2$

proportional ist. Da der Absolutwert für unsere Zwecke nicht interessiert, wird  $S_\lambda$  meist willkürlich normiert (d. h. die Kurve wird mit einem Faktor multipliziert, so daß sie an einer bestimmten Stelle den Wert 1 annimmt).

Trifft der Energiestrom  $S_\lambda \Delta\lambda$  auf die betrachtete Fläche auf, so ist der zum Beobachter reflektierte Energiestrom proportional zu  $S_\lambda \Delta\lambda$  und zum Remissionskoeffizienten  $\beta_\lambda$ , also

$$\phi_\lambda \Delta\lambda = \beta_\lambda \cdot S_\lambda \Delta\lambda \quad (25)$$

für alle Wellenlängen. Daraus kann man die Farbmaßzahlen berechnen

$$\begin{aligned} X &= k \sum_{\lambda} \bar{x}_\lambda \cdot \beta_\lambda S_\lambda \Delta\lambda \\ Y &= k \sum_{\lambda} \bar{y}_\lambda \cdot \beta_\lambda S_\lambda \Delta\lambda \\ Z &= k \sum_{\lambda} \bar{z}_\lambda \cdot \beta_\lambda S_\lambda \Delta\lambda \end{aligned} \quad (26)$$

wobei die Konstante  $k$  üblicherweise so gewählt wird, daß sich für eine ideal mattweiße Fläche die Maßzahl  $Y$ , die die Helligkeit angibt, zu 1 oder 100 % ergibt

$$k = \frac{100}{\sum_{\lambda} \bar{y}_\lambda \cdot \beta_\lambda S_\lambda \Delta\lambda} \quad (27)$$

$Y$  gibt also die relative Helligkeit gegenüber einer vollkommen weißen Fläche in Prozent an, den sogenannten **Hellbezugswert**, und dadurch hat man für die Maßzahl der Helligkeit Unabhängigkeit von der Beleuchtungsstärke erreicht. Dies ist für Körper- oder Aufsichtsfarben äußerst wichtig: Denn in Gegensatz zu farbigem Licht, wo Helligkeit und Farbart als getrennte Eigenschaften wahrgenommen werden, trägt bei Oberflächenfarben die Helligkeit (im Vergleich zu Weiß) wesentlich zur Farbempfindung bei. Während es

kein braunes Licht gibt, allenfalls orangefarbenes geringer Helligkeit, wird eine Oberfläche mit den gleichen Farbmaßzahlen wie Orange, aber geringerer Helligkeit  $Y$ , nicht als dunkelorange, sondern als braun gesehen.

Farben (Valenzen) mit den gleichen Koordinaten  $x, y$ , aber abgestufter Helligkeit  $Y$  nennt man eine **Schattenreihe**.

Daß die Farbarten von Braun und Orange gleich sind, oder die von Gelb und Olivgrün, kann man experimentell mit Hilfe von zwei Projektoren schön veranschaulichen: Zunächst projiziert man in einem abgedunkelten Raum Licht durch ein oranges oder gelbes Filter mit nicht zu großer Helligkeit auf eine Leinwand; die Farbempfindung ist Orange bzw. Gelb. Dann wird mit größerer Helligkeit ein weißer Ring auf die Leinwand projiziert, und sofort erscheint das Innere des Ringes braun bzw. oliv.

Bei der Bewertung von Körperfarben ist durch die allgemeine Beleuchtung schon ein Vergleichsstandard vorhanden, so daß die Empfindung Braun auch ohne weiße Vergleichsfläche zustande kommt.

Bei Körperfarben erhält der Ausdruck „bedingt gleich“ oder „metamere Übereinstimmung“ zweier Farbvalenzen besondere Bedeutung, da die Farben (Farbvalenzen) von der Beleuchtung mitbestimmt werden, wie jeder weiß und wie in den Formeln zum Ausdruck kommt. Wenn wir für zwei verschiedene Oberflächen Farbgleichheit feststellen, dann gilt dies zunächst nur für die eine Beleuchtungsart, bei anderer Beleuchtung kann die Übereinstimmung verloren gehen. Der Unterschied, der dabei auftreten kann, ist natürlich umso größer, je verschiedener die Remissionskurven voneinander sind, so daß es sinnvoll ist, von starker oder schwacher **Metamerie** zu sprechen;

## Der Mechanismus des Farbensehens

### Historische Entwicklung der Theorie

Als Newton in der zweiten Hälfte des 17. Jh. die Aufspaltung des weißen Lichts in ein farbiges Spektrum (d. h. Erscheinung, Gespenst) fand, ordnete er den Strahlen, je nach der Farbe, die sie hervorriefen, verschiedene Brechungsindizes zu. In seinem Farbkreis benennt er sieben Farben (Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo<sup>6</sup>, Violett), denen er verschieden große Anteile zuordnet. Newton untersuchte die additive Farbmischung, ließ es aber bei der unendlichen Vielfalt der Farbtöne bewenden und wandte sich mehr der Optik zu.

Im 18. Jh. gewann die Auffassung an Boden, daß es nur drei Grundfarben im Licht gebe, und zwar Rot, Grün und Violett. Als Beispiel dafür wird eine von Goethe seiner Farbenlehre beigegebene Tafel gezeigt, mit der er eine (in der Allgemeinen Litteratur Zeitung, No. 31, Jena) 1792 erschienene Entgegnung auf seine „Beiträge zur Optik“ illustriert hat. Gegenübergestellt ist ein schematisches Bild dessen, was man beim Betrachten eines weißen Streifens auf schwarzem Grund durch ein Prisma sieht, mit zwei Erklärungen aus der damaligen Zeit. Die eine stammt von Green in Halle und basiert auf den Newtonschen Vorstellungen; die andere, von Wünsch in Frankfurt/Oder, benutzt nur die drei Grundfarben Rot, Grün und Violett. Die in den Kästchen stehenden Farben sind in den waagrechten Reihen additiv zu überlagern. Dabei sollte man sich den Hintergrund aber schwarz, nicht weiß vorstellen.

---

**Bild S. 43:** Tafel IX aus Goethes Farbenlehre (um 1792)

---

Daß diese drei Farben nicht eine besondere Eigenschaft des Lichts sind, sondern durch unsere Sinnesorgane hervorgerufen wer-

---

<sup>6</sup>statt Blau und Indigo würden wir heute Grünblau (Cyan) und Blau sagen

den, wurde von George Palmer noch früher, nämlich 1786, ausgesprochen, fand aber keine Beachtung (G. Walls 1956).

Th. Young, der englische Arzt und Naturforscher, vertrat 1807 diese Ansicht erneut. Zuvor (1802) hatte er als Grundempfindungen noch Rot, Gelb und Blau angenommen. Vielleicht fand er nur deshalb mehr Gehör, weil er zugleich Interferenzexperimente behandelte, die die Wellennatur des Lichts bewiesen. Damit konnten die Physiker seiner Zeit wesentlich mehr anfangen. Wegen der Wellennatur des Lichts nannte Young die entsprechenden Sinnesorgane Resonatoren, und er forderte drei Typen davon, die für rotes (d. h. langwelliges), grünes und violett Licht maximal empfindlich sein sollten: „From three simple sensations, with their combinations, we obtain several primitive distinctions of colours; but the different proportions, in which they may be combined, afford a variety of tints beyond all calculation. The three simple sensations being red, green and violet, the three binary combinations are yellow, consisting of red and green; crimson, of red and violet; and blue, of green and violet; and the seventh in order is white light, composed of all three united“ (Young 1807).

(Aus drei einfachen Empfindungen und ihren Kombinationen erhalten wir einige einfache Farbunterscheidungen; aber die verschiedenen Verhältnisse, in denen sie kombiniert werden können, haben eine unendliche Vielfalt von Farbarten zur Folge. Die drei einfachen Empfindungen sind Rot, Grün und Violett, die drei Zweierkombinationen sind Gelb, das aus Rot und Grün besteht, Karmin, aus Rot und Violett, und Blau, aus Grün und Violett: und die siebente Farbe in der Reihe ist weißes Licht, das aus allen dreien gemeinsam besteht.)

Diese Erklärung entspricht in ihren wesentlichen Zügen der heutigen Auffassung.

Allgemeine Verbreitung erlangte die Youngsche Hypothese erst durch die quantitative Beschreibung von Farbmischungsexperi-

menten durch Helmholtz (1852) und später Maxwell (1860), die im Lichte der Youngschen Erklärung sofort plausibel sind.

In der zweiten Hälfte des 19. Jh. erkannte man die unterschiedlichen Aufgaben von Zapfen und Stäbchen in der Retina, und konnte bald auch den dem Stäbchensehen zugrundeliegenden Farbstoff isolieren, der in verhältnismäßig hoher Konzentration vorhanden ist (Kühne 1878).

Die Zapfen beherbergen also die Youngschen „Resonatoren“, unter denen man sich Licht absorbierende Substanzen, also Farbstoffe, vorzustellen hat.

Die Frage, der sich um die Jahrhundertwende (19./20. Jh.) viele Forscher zuwandten, war die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeitskurven für die drei Youngschen Rezeptortypen. Ohne auf die Details eingehen zu können, sei nur gesagt, daß sie sich aus den an einer großen Zahl von Versuchspersonen gesammelten colorimetrischen Daten nicht eindeutig bestimmen lassen.

Es war Arthur König, der hier den Ausweg aufzeigte: Er nahm an, daß den Rot-Grün- und den Blau-Gelb-Blinden jeweils einer der drei Farbstoffe fehle, und daß zweitens die beiden verbleibenden Farbstoffe mit denen von Normalsichtigen übereinstimmen (König & Dieterici 1892). Aus der Youngschen Theorie folgt mit den Annahmen von König, daß es zwei Arten von Rot-Grün-Blindheit geben solle, und dies wird tatsächlich beobachtet. (Von beiden Formen der Farbblindheit ist jeweils etwa ein Prozent der männlichen Bevölkerung betroffen. Totale Farbenblindheit durch Ausfall zweier oder aller Zapfenarten wird sehr selten ebenfalls beobachtet.) Heute nennt man die drei Arten von Farbfehlsichtigkeit, bei denen der auf lang-, mittel- und kurzwelliges Licht empfindliche Rezeptortyp ausfällt, Protanopie, Deutanopie, Tritanopie (wissenschaftsgriechisch: erste, zweite, dritte Blindheit).

Wegen der individuellen Unterschiede auch bei Farbnormal-sichtigen, die auf unterschiedlicher Pigmentierung, vielleicht sogar

auf dem Vorkommen geringfügiger Unterschiede in den Rezeptorfarbstoffen selbst beruhen, sind allerdings die Ergebnisse der Untersuchungen an Farbenblinden nicht so eindeutig, wie es wünschenswert wäre; so blieb ein gewisser Spielraum für die Vorliebe der einzelnen Forscher.

### Die Grundempfindungskurven

Wir müssen zwischen dem Sehen bei Helligkeit (Tagessehen, photopisches Sehen) und dem bei sehr schwachem Licht (Nachtsehen, skotopisches Sehen) unterscheiden. Die Sinneszellen für das Sehen bei Nacht sind die Stäbchen in der Netzhaut. Diese werden bei Helligkeit abgeschaltet, sie liefern keinen Beitrag zum Farbsehen. Bemerkenswert ist, daß sich die relative Helligkeitsempfindung für die verschiedenen Farben beim Nachtsehen deutlich von der des Tagessehens unterscheidet. Bei sehr schwacher Beleuchtung (wenn keine Farben mehr gesehen werden) erscheint z.B. Dunkelblau heller als ein leuchtendes Orange (Purkinje-Effekt).

Inzwischen weiß man sehr viel über die Lichtrezeptoren in der Netzhaut. In den Stäbchen wird das Licht durch einen Farbstoff, den Sehpurpur, absorbiert, der so reichlich vorhanden ist, daß die Netzhaut rosafarben erscheint. Der farbgebende Teil des Sehpurpurs ist Retinal, das an ein Eiweiß (Opsin) gebunden ist. Die Absorption eines Lichtquants durch ein Retinalmolekül führt zunächst zu einer Formänderung des Moleküls, die am Anfang einer Kette von chemischen Reaktionen steht, die schließlich einen Nervenimpuls auslöst. Die Absorptionskurve des Retinals stimmt gut mit der Empfindlichkeitskurve für das skotopische Sehen überein.

Nach dem heutigen Stand der Erkenntnis leiten sich die in den drei Zapfenarten vorhandenen Farbstoffe alle vom Retinal ab, das an Eiweißstoffe gebunden ist, wobei die verschiedenen Arten der Einbindung die Ursache für die verschiedenen Resonanzfrequen-

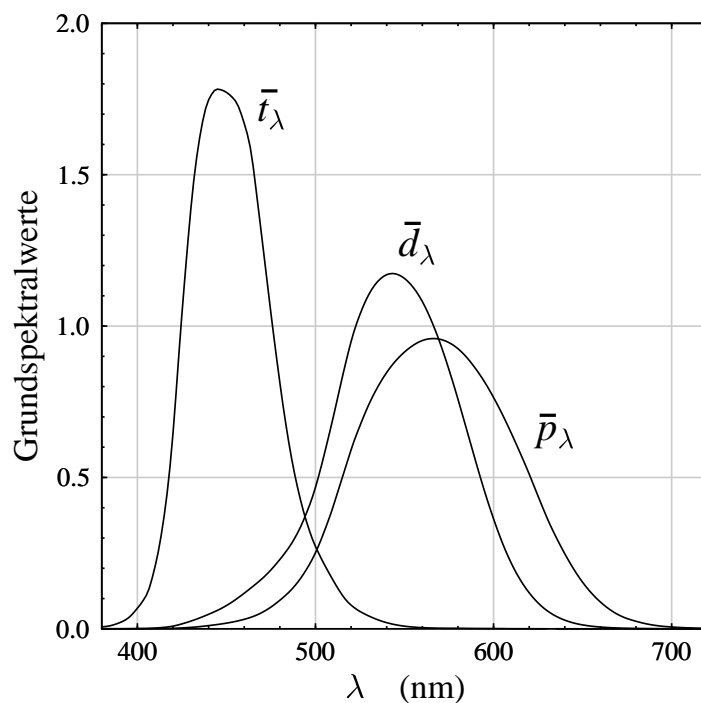


Abbildung 7: Die Empfindlichkeitskurven der drei Zapfenarten in der menschlichen Retina.

---

**Bild S. 44:** Die Grundspektralwertkurven sind die Empfindlichkeitskurven der drei Zapfenarten im Auge des „Normalbeobachters“.

---

zen sind. Allem Anschein nach sind die Empfindlichkeitskurven, genauer: die Lage der Maxima, im Zuge der Evolution optimiert worden.

Bild 7 zeigt die Empfindlichkeitskurven der drei Zapfenarten in der Netzhaut des menschlichen Auges. Die drei Kurven wurden aus den Norm-Spektralwertkurven mit Hilfe von zusätzlichen Daten über Farbenblindheit errechnet. Sie können als Mittelwerte gelten, genommen über eine große Anzahl von Versuchspersonen.

Für den Unvoreingenommenen ist dieses Bild zunächst einmal überraschend. Man hätte drei voneinander deutlich getrennte Glockenkurven erwartet (wie man sie auch bei Fischen vorfindet), statt dessen überlappen sich die den Eindruck „Rot“ vermittelnde p-Empfindlichkeitskurve mit der „Grün“ vermittelnden d-Kurve sehr stark. Die „Blau“ vermittelnde t-Kurve ist von den beiden anderen deutlich getrennt. Was ist der Vorteil dieser Anordnung gegenüber der zunächst plausibleren?

Teilt man die Helligkeits-Empfindlichkeitskurve  $V_\lambda$  (mit dem Maximum von 1) auf die drei Mechanismen auf, so findet man, daß die Maxima der drei Anteile 0,54 (rot, p), 0,58 (grün, d) und 0,018 (blauviolett, t) betragen (Wald 1964). Daraus kann man ablesen, daß die rot- und grünvermittelnden Zapfen ungefähr gleich stark zur Helligkeitsempfindung beitragen, die blauviolettvermittelnden aber nur etwa mit einem Prozent! Warum so wenig?

Der Grund für die Unterdrückung des Blauviolett-Beitrags zur Helligkeit dürfte der gleiche sein, der einen nur geringen Unterschied zwischen  $p_\lambda$  und  $d_\lambda$  zum Vorteil macht, nämlich die Farbfehler in Hornhaut und Linse. Wegen dieser Farbfehler ist Scharfeinstellung exakt nur für eine Wellenlänge möglich. Der Unterschied in der Brechkraft von Hornhaut und Linse zusammen für 578 nm und für 450 nm beträgt ziemlich genau eine Dioptrie! (Wyszecki & Stiles 1967).

Es mag erstaunen, daß die Farbfehler existieren, denn man nimmt sie normalerweise nicht wahr. Aber Auge und Gehirn tun ihr bestes um alle störenden Einflüsse vom Bewußtsein fernzuhalten.

---

**Bild S. 45:** Horizontaler weißer Streifen auf schwarzem Grund zur Demonstration der Farbfehler des Auges

---

Man kann die Farbfehler sichtbar machen, wenn man ihr Erscheinungsbild verändert: deckt man mit der dicht vor dem Auge gehaltenen Hand den größten Teil der Pupillenöffnung ab, so wirkt der Randbereich von Hornhaut und Linse wie ein Prisma, das das Licht aufspaltet. Betrachtet man auf diese Weise einen auf eine Leinwand projizierten Lichtstreifen (oder ein anderes geeignetes Objekt), so sieht man an dem Streifen auf einer Seite einen schmalen rot-gelben, auf der anderen einen schmalen dunkelblau-hellblauen Saum.

Wegen dieser Farbfehler ist es günstig, wenn die Maxima von  $\bar{p}_\lambda$  und  $\bar{d}_\lambda$  nicht weit auseinanderliegen, dann ist eine mittlere Einstellung für beide Mechanismen gut, nicht aber für den t-Mechanismus. Das blauviolette Netzhautbild ist daher zu unterdrücken, wenn die Bildschärfe nicht beeinträchtigt werden soll, denn bei Scharfstellung für p und d ist es unscharf! Die Eigenschaft von Violettblau, dunkel, und von Gelb (gleich Weiß minus Violettblau), hell zu sein, kann man somit aus der Wirkungsweise unserer Augen als vorteilhaft einsehen.

### **Wann sehen wir welche Farben?**

Wir kennen nun die Empfindlichkeitskurven der Zapfen in der Netzhaut. Bild 8 zeigt schematisch idealisiert, wie Remissionskurven aussehen, die so geartet sind, daß jeweils die Anregung einer Art von Zapfen die der anderen stark überwiegt. Wird von einer Oberfläche das Licht in kurz- und mittelwelligen Bereich absorbiert, das im langwelligen Bereich jedoch zurückgeworfen (remittiert, Remission = diffuse Reflexion), dann sehen wir diese Oberfläche rot.

(Im folgenden wird vorausgesetzt, daß keine anderen Hinweise auf die Art der Farbe wahrgenommen werden, und daß die Beleuchtung dem Tageslicht entspricht oder ähnlich ist.) Entsprechend erhalten wir den Sinneseindruck „Grün“, wenn im mittelwelligen Bereich das Licht zurückgeworfen, im lang- und im kurzwelligen Teil des sichtbaren Bereiches jedoch absorbiert wird (grüne Kurve in Bild 8). Entsprechendes gilt für die blau gezeichnete Kurve.

Man beachte, daß beim Blau die grünvermittelnden d-Zapfen auch schon merklich zum Farbeindruck und zur Helligkeitsempfindung beitragen. Werden wirklich nur die t-Zapfen angeregt, dann entsteht der Eindruck „Violettblau“ mit geringer Helligkeit.

Wann entsteht nun aber die Empfindung „Gelb“? Bestimmt nicht dann, wenn nur der im Spektrum des Lichts gelb erscheinende Wellenlängenbereich remittiert wird. Dieser Bereich von 570 nm bis 585 nm ist so klein, daß wir eine sehr dunkle Farbe sehen müßten. Gelb ist aber hell!

Man kann qualitativ das Remissionsvermögen von Farbpapier prüfen, indem man einen schmalen Streifen davon auf eine schwarze Unterlage legt und ihn durch ein Prisma betrachtet. Im Vergleich mit einem Streifen aus weißem Papier stellt man fest, daß die Remission von Gelb und Weiß sich nur im kurzwelligen, „blauen“ Bereich unterscheidet. Gelb ist „Weiß minus Blau“ (siehe Bild 9).

## Die einzelnen Farben

Die Eigenschaften der Farben, wie sie der Maler kennt, sind viel weniger Eigenschaften der Farbstoffe als des Gesichtssinnes, die sich in unseren Empfindungen äußern.

Der auffallend enge Farbbereich des Gelben sowohl in einem durch Mischung erzeugten, empfindungsmäßig gleichabständigen Farbkreis als auch in dem Spektralband hat seine Ursache in den physiologischen Gegebenheiten: Gelb ist die Verschlüsselung für

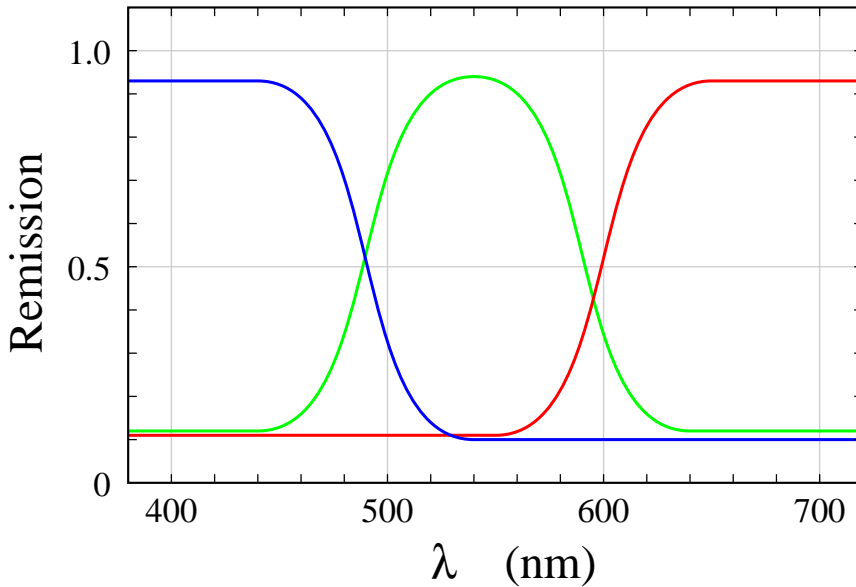


Abbildung 8: Drei Remissionskurven (schematisch), die den Oberflächenfarben Blau, Grün und Rot entsprechen

---

**Bild S. 46:** Drei Remissionskurven (schematisch), die den Oberflächenfarben Blau, Grün und Rot entsprechen

---

„keine oder geringe Erregung der Blauviolett-Rezeptoren, Erregung der Rot- und Grün-Rezeptoren gleich stark (d. h. wie bei Weiß)“, die Verschlüsselung für „Weiß minus Blau“ sozusagen. Die Empfindung „Grün“ dagegen bedeutet: „Die Erregung der Rezeptoren für mittlere Wellenlängen überwiegt die beiden anderen“, und dies ist natürlich in verschiedenen Verhältnissen möglich, während Gleichheit nur bei einem Verhältnis, 1:1, gegeben ist.

Wird dagegen von einer Fläche nur Licht kurzer Wellenlängen ins Auge reflektiert, so daß die blauviolett-vermittelnden Zapfen etwa gleich stark wie bei Weiß erregt werden, die anderen beiden Arten dagegen nur schwach, so ist die Empfindung „Blau“. Wegen der Überlappung der Empfindlichkeitskurven werden dabei aber die grünvermittelnden Zapfen doch schon nennenswert mitangeregt. Blau ist „Violettblau mit etwas Grün“. Die Empfindung, die einer Erregung der t-Zapfen allein entspricht, ist sehr selten, kommt unter natürlichen Gegebenheiten praktisch nie vor. Es wäre für jeden Organismus unzweckmäßig, eine nicht vorkommende Farbe als Ur-Farbempfindung zu haben, wenn wir unterstellen, daß den Urfarben besonders gute Erkennbarkeit zukommt.

Die Urfarben Gelb und Blau sind komplementär (d. h. die additive Mischung gibt Weiß, oder die Mischung mit dem Farbkreisel neutrales Grau). Die Urfarben Rot und Grün dagegen sind kein komplementäres Paar. Ihre Mischung mit dem Farbkreisel kann in keinem Verhältnis auf Neutralgrau führen.

Gelb nimmt unter den „subtraktiven Primärfarben“ Gelb, Grünblau und Purpur eine Sonderstellung ein, indem es einmütig von allen als Grundempfindung anerkannt wird, da es keine Ähnlichkeit mit Rot und Grün hat. Dagegen ist bei Grünblau und Purpur die Zwischenstellung empfindungsmäßig selbstverständlich.

## **Psychologische Aspekte**

Niemand wird bestreiten, daß wir von Farben beeinflusst werden. Am eindringlichsten ist dies vermutlich bei der allgemeinen Raumbeleuchtung zu beobachten, weil durch sie die gesamte Umgebung und auch die Mitmenschen in ihrem Aussehen betroffen werden. Bei Tagesbeleuchtung ist es neben der Helligkeit in erster Linie der Warm-Kalt-Kontrast, der den Unterschied zwischen den

Lichtverhältnissen bei Schön- und Schlechtwetter, zwischen einem Zimmer nach Norden und einem sonnigen nach Süden gerichteten ausmacht.

Aber auch farbige Oberflächen können uns beeinflussen, sofern ihnen in unserer Umgebung ein genügendes Gewicht zukommt, wie beispielsweise bei Tapeten oder Möbeln. Hierzu sei **Goethe** zitiert: „Die Farben von der Plusseite sind Gelb, Rotgelb [Orange], Gelbrot (Mennig, Zinnober). Sie stimmen regsam, lebhaft, strebend (Absatz 764). Dies wird für die einzelnen Farben weiter ausgeführt. Gelb: besitzt eine heitere, muntere, sanft reizende Eigenschaft ... macht warmen und behaglichen Eindruck ...

Gelbrot (d. h. Rot, im Gegensatz zu Purpurrot); ... Das angenehme Gefühl, das uns das Rotgelbe noch gewährt, steigert sich bis zum unerträglich Gewaltsamen im hohen Gelbroten ... kein Wunder, daß energische, gesunde, rohe Menschen sich besonders an dieser Farbe erfreuen.“

„Die Farben ... Blau, Rotblau und Blaurot. Sie stimmen zu einer unruhigen, weichen und sehnenenden Empfindung (Absatz 777).

Und über die grüne Farbe schreibt Goethe: „Unser Auge findet in derselben eine reale Befriedigung ... so ruht das Auge auf diesem Gemischten wie auf einem Einfachen. Man will nicht weiter und man kann nicht weiter. Deswegen für Zimmer, in denen man sich immer befindet, die grüne Farbe zur Tapete meist gewählt wird“ (Absatz 802).

Goethe gibt seine Beobachtungen als allgemein und immer gültig. Aber die Vorliebe für bestimmte Farben kann sich ändern, durch wechselnde Mode, Erlebnisse oder intensive Beschäftigung mit bestimmten Farben. So erscheint es nicht unwahrscheinlich, daß auch der Einfluß der Farben auf uns nicht absolut feststeht, sondern von unserer Stimmung abhängt und wohl auch von der Gewöhnung durch häufigen Anblick.

Ich glaube, daß man zwischen der Wirkung, die die Farbe auf

einen Menschen ausübt, und der Bevorzugung einiger Farben einen Zusammenhang annehmen darf. Etwa derart, daß in ausgeruhter, gutgelaunter und tatendurstiger Verfassung Orange und Rot wegen der Übereinstimmung mit der Gefühlslage angenehm empfunden werden, Blau und Grün vielleicht als langweilig, während bei innerer Unruhe und Erschöpfung ruhig stimmende, allgemein dunklere Farben bevorzugt werden und man meint, grelle Farben würden einen nur noch „kribbeliger“ oder nervöser machen.

Darüberhinaus kann die Vorliebe für oder Abneigung gegen gewisse Farben von Assoziationen geprägt sein, die bewußt oder nur noch unbewußt nachwirken.

Künstler, Psychologen und andere haben nach Goethe immer wieder die Wirkungen von Farbe auf den Menschen untersucht und beschrieben. Hier soll darauf nicht näher eingegangen werden; vergleicht man die Aussagen der verschiedenen Autoren über sie psychische und psychosomatische Wirkung der Farben, so finden wir in den wesentlichen Punkten allgemeine Übereinstimmung.

### **Das Leben in der Wildnis**

Wir konnten früher sogar einsehen, daß es für die Sehschärfe einen Vorteil bedeutet, Blauviolett dunkel und Gelb hell zu sehen.

Die Behauptung der Psychologen, daß die Bedeutung der Farben für den Menschen und ihre Wirksamkeit auf ihn weitgehend unabhängig von Rasse und Kultur ist, läßt uns vermuten, daß sich diese beinahe reflexartige Reaktion auf Farben schon vor langer Zeit ausgebildet hat und nicht durch die Flut von farbigen Reizen, die heute auf uns einwirken, bestimmt ist.

In der Zeit, als eine angemessene Reaktion auf Farben, die sie in der Natur gesehen wurden, für das Leben und Überleben so viel Bedeutung hatte, daß ihr eine Auslesefunktion zukam, konnte sich eine einheitliche Beziehung zwischen Farbempfindungen und Ge-

fühlen entwickeln, und so könnte die erstaunlich einheitliche Reaktion auch des Körpers auf Farben eine Folge einer Anpassung sein, deren Zweckmäßigkeit heute allerdings nicht mehr augenfällig ist.

Daher müssen wir unsere Aufmerksamkeit auf die Lebensbedingungen der Vergangenheit richten, auf die vorgeschichtlichen Zeiträume, ja sogar auf die vormenschlichen Entwicklungsstadien, auf die im Vergleich zur historischen Zeit unermesslichen Zeitspannen von -zig Millionen Jahren seit der Entwicklung des Farbsehens im Menschen- und Affen-Vorfahren. Dies soll nicht heißen, daß nicht vielfach heute ganz ähnliche Erfahrungen gemacht werden können, Erfahrungen, die die Entwicklung der gleichen gefühlsmäßigen Beziehungen auch heute noch begünstigen, da sich manche Bedingungen eben seit -zig Millionen Jahren nicht wesentlich geändert haben.

In welcher Form hatte nun der Ur- oder Vormensch auf Farb- reize zu reagieren? Farbreize wurden z. B. von Blüten geboten; aber die Blütenfarben haben sich in Wechselwirkung mit dem Farbsinn der Insekten entwickelt und enthalten keine an den Menschen oder an Säugetiere gerichtete gezielte Aufforderung. Dagegen die Farben der Früchte, die die Handlung des Pflückens, des Hinlangens und Fressens auslösen sollen, damit die Samen verbreitet werden. Auch die Buntheit der Beeren und anderen Früchte hat sich nicht wegen des Farbsinns der Vorfahren des Menschen und durch ihn ergeben, aber wir profitieren hier von der Farbtüchtigkeit der Vögel, und vielleicht auch der Saurier, denen zuliebe das reife Obst sich auffällig bunt darbot.

Aber Rot tritt nicht nur als Farbe reifer Früchte auf! Auch unter den jetzt lebenden Affen beobachtet man die Aufnahme gemischter Kost, also auch von Fleisch als Nahrung. Das Blut der erbeuteten Tiere, das den Erfolg des Jägers zeigt, bedeutet Jagd, Kampf, Anstrengung; das Blut der Artgenossen bedeutet Aggression, Kampf mit größtem Einsatz, oder auch, dem, der sich dem Kampf nicht ge-

wachsen fühlt, stärkste Aufforderung zur Flucht. Kein Wunder also, wenn Herztätigkeit und Atmung und Anspannung hormonell gesteigert werden. Kein Wunder, wenn Rot polyvalent auf uns wirkt, aber immer Aktivität fordert. Und in guter körperlicher und seelischer Verfassung erfolgt sicherlich leichter die Identifikation mit dem Jäger, der das Rot angenehm erlebt; fühlt man sich schwach, dann eher mit dem Gejagten, der es flieht.

Da Rot auf jeden Fall Beachtung auf sich zieht, liegt sein Einsatz zur Übermittlung oder Steigerung sexueller Reize nahe.

Die sehr gegensätzlichen Assoziationen des Blutes entfallen bei den Farben Gelb und Orange, die Aufforderung des Gelben ist daher viel milder, und ebenso die von Orange.

Grün, die Farbe der Blätter, ist von der Pflanze her für niemand als Lockmittel gemeint, sondern durch das bei der Nutzbarmachung der Sonnenenergie benötigte Blattgrün bedingt. Es wäre unzweckmäßig, wenn in einer rundherum grünen Umgebung jedes Fleckchen Grün die Aufmerksamkeit auf sich zöge. Daher müssen wir Laubgrün, Dunkelgrün, Bläulichgrün als ruhig, uns in Ruhe lassend empfinden.

Dunkelblau: Abenddämmerung, Umstellung des Körpers auf Nachtruhe

Braun ist in der natürlichen Umgebung häufig. Als Erdfarbe, Haut- Fell- oder Haarfarbe, Farbe des Herbstlaubes, aber auch der Fäulnis und des Kotes. Dem Farbton nach ist es ein schwärzliches Orange. Während aber schwärzliches Blau oder Grün immer noch als Blau oder Grün empfunden wird, ist es – wegen der Häufigkeit einerseits, und wegen der meist gegebenen Ungenießbarkeit der natürlich vorkommenden braunen Dinge – zweckmäßig, Dunkelorange völlig anders zu empfinden als das auffordernde Orange. Braun wirkt also ähnlich ruhig wie Grün. Da es eine warme Farbe ist, gemütlich; vielleicht infolge der Ur-Erfahrung der Erdhöhle entspricht es dem Gefühl der Geborgenheit. Je nach den Assoziationen,

die es sonst noch hervorruft, und die von der genauen Farbart und Helligkeit abhängen dürften, wirkt es anheimelnd, abstoßend oder neutral.

Farbzusammenstellungen: Die Reaktion auf „schwarz-gelb gestreift“ ist „Vorsicht, wegbleiben!“, so wie man schwarz-gelb gestreifte Insekten lieber nicht anfaßt. Die Signalwirkung der der Kombination unterscheidet sich erheblich von der der einzelnen Farben, und dies ist wohl das deutlichste Beispiel dafür, daß die emotionalen Qualitäten sich nicht einfach aufaddieren müssen, sondern in gewissen Fällen in ganz andere umschlagen.

Wir wollen diese Ideen hier nicht weiter ausspinnen, obwohl es ganz reizvoll sein könnte.

## Farben mischen

Die meisten von uns wissen aus früher Kindheit, daß gelbe und blaue Farbe zusammengemischt grüne Farbe ergibt. Das wird vereinfacht zu „Gelb und Blau gibt Grün“ verallgemeinert.

Die Mischung von Substanzfarben ist schwierig exakt quantitativ zu erfassen, aber zum Glück ist das Ergebnis in den meisten Fällen ähnlich dem, das man beim Hintereinanderlegen von Farbfiltern erhält. Diese Art von Farbmischung nennt man **subtraktive Mischung**; durch subtraktive Mischung aus drei Grundfarben Grünblau (Cyan), Purpur (Magenta) und Gelb, jeweils in verschiedener Konzentration, wird z. B. beim Farbfilm die ganze Vielfalt der wiedergegebenen Farben erzeugt. Auch beim Vierfarbendruck werden die gleichen Grundfarben verwendet (die vierte Farbe ist Schwarz); die übereinandergedruckten Farbschichten wirken wie Filter.

Anhand von typische Durchlässigkeitskurven von Farbfiltern lassen sich die Ergebnisse des subtraktiven Mischens leicht veranschaulichen.

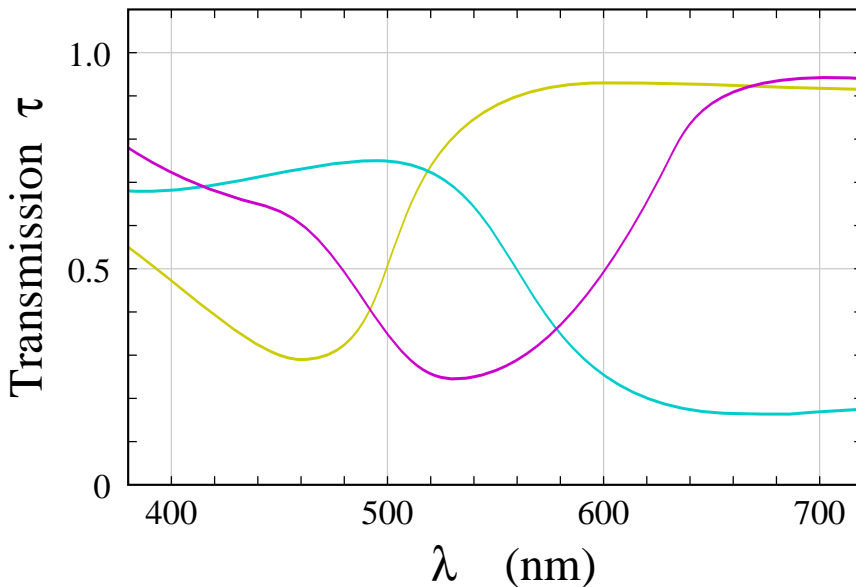


Abbildung 9: Transmissionskurven (Durchlässigkeitskurven) der Farben, die im Drei- und Vierfarbendruck verwendet werden (subtraktive Primärfarben).

---

**Bild S. 47:** Transmissionskurven (Durchlässigkeitskurven) der Farben, die im Drei- und Vierfarbendruck verwendet werden (subtraktive Primärfarben).

---

**Bild S. 48:** Drei hintereinandergelegte Farbfilter: Schema der Subtraktiven Mischung mit den Farben Gelb, Magenta und Cyan.

---

An die subtraktive Farbmischung aus der eigenen Erfahrung gewöhnt, wird mancher vom Ergebnis der Mischung von Gelb und Blau mit dem Farbkreisel überrascht sein.

Das Auge löst die in rascher Aufeinanderfolge eintreffenden Farbreize nicht mehr auf, sondern nimmt den Mittelwert wahr; man spricht daher von **Mischung durch Mittelung**. Auch hier läßt sich

das Ergebnis mit typischen Remissionskurven plausibel machen. Mischung durch Mittelung tritt auch auf, wenn die Farben in kleinen Bereichen nebeneinanderliegen und aus größerer Entfernung betrachtet werden.

---

**Bild S. 49:** Drei übereinander gestrahlte Lichter in den Grundfarben Rot, Grün und Blau: Schema der Additiven Mischung

---

Die theoretisch am einfachsten zu behandelnde Art von Farbmischung, die **additive Mischung**, haben wir als Grundlage der Farbmessung kennengelernt. Wir finden sie heute an Fernseh- und Computerbildschirmen allenthalben. Betrachten Sie an einem Computerbildschirm eine weiße oder, besser noch, eine graue Fläche aus der Nähe mit einer starken Lupe! Sie finden ein Raster aus roten, grünen und blauen Punkten oder Streifen. Die Intensität von Rot, Grün und Blau läßt sich unabhängig voneinander einstellen. Die maximalen Helligkeiten der drei Farben sind so aufeinander abgestimmt, daß sich Weiß ergibt, wenn alle drei Farben mit voller Stärke angeregt werden. Auch in der Beleuchtungstechnik gewinnt die additive Farbmischung durch moderne Lichtquellen (steuerbare RGB-Leuchten) zunehmend an Bedeutung.

### **Farbabstände, CIE-L\*u\*v', CIE-L\*u\*v\*, ...**

Unter einem Gesichtspunkt ist die Normfarbtafel recht unbefriedigend: die Abstände der Farbarten in der Tafel entsprechen nicht den subjektiv empfundenen Farbunterschieden.

Dies ist weiter nicht erstaunlich, da wir ja bei der Farbmessung die Empfindung, sofern sie über das Gleichheitsurteil hinausgeht, völlig ausgeklammert haben. Wenn eine Empfindung, z. B. die der Farbabstände, in die Untersuchung mit einbezogen wird, so geht das über unsere anfängliche Beschränkung hinaus.

Man kann ein Maß für den empfindungsgemäßen Abstand aus der Unterscheidbarkeit benachbarter Farbvalenzen gewinnen, die sich z. B. in der Streuung der Meßpunkte bei oft wiederholtem Farbvergleich äußert. Solche Untersuchungen wurden von Mac Adam (1942) durchgeführt. Andere Ansätze stammen von Schrödinger (1920) und von Stiles (1946).

Man kann die Normfarbtafel „perspektivisch“ verzerren, so daß die Abstände in der Farbtafel annähernd den empfundenen Farbunterschieden entsprechen. So kam das 1976 CIE- $u',v'$  Diagramm zustande.

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}, \quad v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}, \quad (28)$$

und umgekehrt

$$x = \frac{9u'}{6u' - 16v' + 12}, \quad y = \frac{4v'}{6u' - 16v' + 12}. \quad (29)$$

Der Übergang vom  $x$ - $y$ - in das  $u'$ - $v'$ -Diagramm ist eine Transformation von der gleichen Art wie der früher besprochene Wechsel von einem Satz Primärvalenzen zum anderen.

---

**Bild S. 50:** Normfarbtafel mit Farben gleicher, mittlerer Helligkeit aus der sRGB-Palette (den durch die Standard-RGB-Valenzen darstellbaren Farben).

---

**Bild S. 51:** CIE  $u'v'$  Normfarbtafel mit den gleichen Farben wie im vorigen Bild S. 50.

---

Empfindungsmäßig gleichabständige Farbkörper, bei denen also gleiche Abstände gleichen empfundenen Farbunterschieden entsprechen, sind streng genommen unmöglich. Aber Farbkörper, die diesem Ideal nahekommen, näher als CIE-XYZ oder CIE-xyY jedenfalls, gibt es glücklicherweise doch.

Die Auftragsweise der CIE  $u'v'$ -Tafel erfüllt bei festgehaltener Helligkeit die Forderung schon recht gut. Sollen aber auch die Helligkeitsunterschiede als gleichmäßig gestuft empfunden werden, dann darf als Maß für die Helligkeit nicht  $Y$  verwendet werden, denn bei zunehmender Helligkeit erscheinen gleiche Schritte von  $Y$  immer kleiner.

Dies läßt sich mit dem Farbkreis gut demonstrieren: Versucht man, eine gleichmäßige Grauskala mit dem Farbkreis zu erzeugen, so ergibt sich folgendes Bild

---

**Bild S. 52, 53:** Grauskala auf dem Farbkreis. (a) Gleichmäßige Zunahme der Weiß-Anteile führt auf eine ungleichmäßig empfundene Abstufung (qualitative Wiedergabe eines Experiments). Links die Scheibe in Ruhe, der Weißanteil nimmt von innen nach außen in Schritten von 0.2 zu, rechts das Erscheinungsbild der Scheibe, wenn sie sich schnell dreht. (b) Wenn die Weißanteile nach einer geometrischen Reihe gestaffelt sind (nach Weber und Fechner), erscheint die resultierende Grauskala gleichmäßiger gestuft.

---

Es ist üblich, den Zusammenhang zwischen Helligkeit (Leuchtdichte)  $Y$  und empfundener Helligkeit  $L$  durch ein Potenzgesetz zu parametrisieren. Sei  $Y_w$  die Leuchtdichte von „Weiß“,  $L_w$  entsprechend und  $Y_{\text{rel}} = Y/Y_w$  die relative Leuchtdichte,  $L_{\text{rel}}$  die relative Helligkeit, dann setzt man (für nicht zu kleine Werte von  $Y_{\text{rel}}$ )

$$Y_{\text{rel}} = [(L_{\text{rel}} + a)/(1 + a)]^\gamma. \quad (30)$$

Richtwerte<sup>7</sup> (für Fernseher und Computermonitore) sind  $\gamma = 2.4$ ,  $a = 0.055$ ; mit diesen Konstanten gilt Gleichung (30) für  $Y_{\text{rel}} > 0.00304$ .

Die Erfahrung zeigt, daß der optimale Wert von  $\gamma$  von der Helligkeit der Umgebung abhängt, je heller die Umgebung, desto klei-

---

<sup>7</sup><http://www.color.org/sRGB.xalter>

ner ist  $\gamma$  zu wählen. Für Grau, das empfindungsmäßig in der Mitte zwischen Schwarz und Weiß steht, ist nach Gl. (30) die relative Leuchtdichte  $Y_{\text{rel}} \approx 0.21$  einzustellen.

Geringe Umgebungs-Helligkeit voraussetzend, wurde in einem Vorschlag der CIE von 1976 der Zusammenhang zwischen  $Y$  und der empfundenen Helligkeit  $L^*$  durch ein Potenzgesetz angenähert (entsprechend Gleichung (30) mit  $\gamma = 3$  und  $a = 0.16$ ).

$$L^* = \begin{cases} 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16 & \text{für } Y/Y_n > 0.008856 \\ 903.3 Y/Y_n & \text{sonst,} \end{cases} \quad (31)$$

und aus den oben eingeführten Koordinaten  $u', v'$  die neuen Koordinaten  $u^*, v^*$  gemäß

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n), \quad v^* = 13L^*(v' - v'_n) \quad (32)$$

berechnet, wobei  $Y_n, u'_n, v'_n$  die entsprechenden Koordinaten des Weiß-Bezugspunktes (beim Bildschirm) oder der Lichtquelle sind. Man beachte, daß  $L^*$  für ideales Weiß den Wert 100 hat.

In den so eingeführten 1976 CIE- $L^*u^*v^*$ -Koordinaten kommt der Farbkörper der empfindungsmäßigen Gleichabständigkeit sehr nahe.

**Bild S. 54, 55:** Auf dem Bildschirm darstellbarer Teil des Farbkörpers im CIE  $L^*u^*v^*$ -Farbraum in zwei Ansichten, jeweils als Stapel von Schichtflächen gleicher Helligkeit.

Eine weitere Parametrisierung des Farbraumes mit etwas einfacheren Umrechnungsformeln wurde im gleichen Jahr vorgeschlagen, 1976 CIE  $L^*a^*b^*$  genannt.

Auf der Helligkeitsachse wird  $L^*$  aufgetragen, in den beiden anderen dazu senkrechten Richtungen die Koordinaten  $a^*$  („Rot minus Grün“) und  $b^*$  („Gelb minus Blau“), die wie folgt berechnet

werden:

$$\begin{aligned} a^* &= 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \\ b^* &= 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)], \end{aligned} \quad (33)$$

wobei

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3} & \text{für } t > 0.008856 \\ 7.787t + 16/116 & \text{sonst} \end{cases} \quad (34)$$

und  $X_n, Y_n, Z_n$  die Maßzahlen vom Referenz-Weiß sind.

---

**Bilder S. 56–74:** Schichtweiser Aufbau des auf dem Bildschirm darstellbaren Teils des Farbkörpers im CIE  $L^*a^*b^*$ -Farbraum durch Flächen gleicher Helligkeit.

---

Die Rücktransformation lautet (für  $Y/Y_n > 0.008856$ )

$$\begin{aligned} P &= (L^* + 16)/116, \\ X &= X_n(P + a^*/500)^3, \\ Y &= Y_n P^3, \\ Z &= Z_n(P - b^*/200)^3. \end{aligned} \quad (35)$$

Dieser Farbraum wird heute überwiegend benutzt, wenn es um Kennzeichnung von Farben und Festlegung von Toleranzen geht. Die in den rechtwinkligen Koordinaten berechneten Farbabstände

$$\Delta F = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (36)$$

entsprechen einigermaßen den empfundenen Abständen.

Es ist zu betonen, daß die Vektoraddition zur Berechnung der additiven Farbmischung wie im CIE-XYZ-Raum in den „gleichabständigen“ Farbräumen nicht mehr möglich ist. Aufgrund der nichtlinearen Transformationsformeln gibt es im  $L^*u^*v^*$ -,  $L^*u^*v^*$ - und  $L^*a^*b^*$ -Raum keine so einfachen Zusammenhänge.

## Schluß

Die Ordnung der Farben führt auf dreidimensionale Farbkörper. Die Dreidimensionalität ist durch den Sachverhalt bedingt, daß in der Netzhaut des menschlichen Auges (farbfehlsichtige ausgenommen) drei verschiedene Typen von Farbrezeptoren (Zapfen) vorhanden sind. Die Farbigkeit der Welt, wie wir sie sehen, ist für uns Menschen und unsere nächsten Verwandten spezifisch. Hätten wir viererlei Farbrezeptoren (wie z. B. die Vögel), so würden sich vierdimensionale Farbkörper ergeben und Farbmustersammlungen müßten viel reichhaltiger sein. Die Eigenschaften der Farben<sup>8</sup> sind Eigenschaften unseres Gesichtssinnes.

## Literatur

- J. Albers, *Interaction of Color* (deutsche Übersetzung) – DuMont-Schauberg, Köln 1970
- P. K. Brown and G. Wald, *Visual Pigments in single Rods and Cones of the Human Retina*. *Science* 144 (1964) 45
- DIN 5033: Farbmessung
- DIN 6164: DIN Farbenkarte, mit Beiblättern 1–25
- O. E. Eizner Favreau and M. C. Corballis, *Negative Aftereffects in Visual Perception*, *Sci. Am.*, Dec. 1976, p. 42
- J. W. Goethe, *Farbenlehre*. Vollständige Ausgabe der theoretischen Schriften. Wissenschaftliche Buchgemeinschaft e.V., Tübingen 1953 — Tafeln dazu, Darmstadt 1954
- J. W. Goethe, *Farbenlehre*. Didaktischer Teil und Geschichte der Farbenlehre I und II. Deutscher Taschenbuch Verlag, Goethe Gesamtausgabe, Bd. 40–42 (1963)

---

<sup>8</sup>nicht mit Farbstoffen zu verwechseln!

- I. Guild, The Colorimetric Properties of the Spectrum, Phil. Trans. Roy. Soc. (London) A230 (1931/32) 149
- T. H. Goldsmith: Vögel sehen die Welt bunter. Spektrum der Wissenschaft, Januar 2007, S. 96–103
- H. Graßmann, Zur Theorie der Farbmischung. Poggendorffs Annalen der Physik 89 (1853) 69
- J. Itten, Kunst der Farbe – Otto Maier, Ravensburg 1961
- A. König, C. Dieterici, Die Grundempfindungen in normalen und anomalen Farbsystemen und ihre Intensitätsverteilung im Spektrum. Z. Psychol. u. Physiol. d. Sinnesorg. 4 (1892) 241
- A. H. Munsell, Atlas of the Munsell Color System – Wadsworth-Howland, Boston (Mass.) 1915
- A. H. Munsell, Book of Colors – Munsell Color Comp., Inc., Baltimore
- W. Ostwald, Farbenlehre, 2 Bde. Unesma, Leipzig 1923
- W. Ostwald, Farbnormen-Atlas. Unesma, Leipzig 1923/24
- G. Palmer (1786). Notiz von D. L. MacAdam mit Hinweis auf Bezugsmöglichkeit von Palmers Schriften. J. Opt. Soc. Am. 60 (1970) 296
- B. Pinna, J. S. Werner, L. Spillmann, in Vision Research, Bd. 43, S. 43, 2003
- M. Richter, Einführung in die Farbmeterik. Walter de Gruyter, Berlin 1976 (Sammlg. Göschel Bd. 2605)
- W. A. H. Rushton, Journ. Physiol. 129 (1955) 41
- W. A. H. Rushton, Visual Pigments in Man. Sci. Am., Nov. 1962, p. 120
- W. A. H. Rushton (1969a). Light and Dark Adaptation of the Retina. Proc. Int. School of Physics "Enrico Fermi" 43 (1969) 544

- W. A. H. Rushton (1969b). Colour Perception in Man, *ibid.* p. 565
- W. A. H. Rushton, Visual Pigments and Color Blindness, *Sci. Am.*, March 1975, p. 64
- E. Schrödinger, Grundlinien einer Theorie der Farbenmetrik im Tagessehen. *Ann. Physik (IV)* 63 (1920) 397 u. 489
- N. I. Speranskaya, Determination of Spectrum Color Coordinates for Twenty-seven Normal Observers. *Optics and Spectroscopy* 7 (1959) 424
- W. S. Stiles, J. M. Burch, N.P.L. Color Matching Investigation, Final Report (1958). *Optica Acta* 6 (1959) 1
- G. Wald, The Receptors of Human Color Vision. *Science* 145 (1964) 1007
- J. S. Werner, B. Pinna, L. Spillmann, Farbtäuschungen und Gehirn. *Spektrum der Wissenschaft*, August 2007, S.32
- W. D. Wright, A Redetermination of the Trichromatic Coefficients of the Spectral Colours. *Trans. Opt. Soc. (London)* 30 ( 1928/29) 144
- G. Wyszecki, W. S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulas* – John Wiley & Sons, New York 1967
- Th. Young, *Lectures on Natural Philosophy*, 1807