

# Vom Licht zur Beleuchtung

Teil 2: Licht und Farbe



### Farbsehen ist subjektiv

Über Auge und Gehirn eines Betrachters wird Licht zu einer Empfindung, die sowohl auf einem Helligkeits- als auch einem Farbeindruck beruht. Das menschliche Auge besitzt für das Farbsehen drei Arten von Lichtsensoren (Zäpfchen), deren Ausgangssignale (Farbreize) zum Gehirn geleitet und dort zu allen Farben verarbeitet werden. Das macht deutlich, dass das Farbempfinden keine absolut eindeutige Fähigkeit ist, sondern von Individuum zu Individuum variiert und von vielen weiteren Randbedingungen abhängt. Farbe ist also keine physikalische Größe, sondern eine Sinnesempfindung, an deren Entstehen physikalische, chemische, physiologische und psychologische Mechanismen mitwirken.

An **Bild 1** wollen wir dies verdeutlichen. Hier sehen wir aus einer biologisch geprägten Sicht, wie es zu einem Farbeindruck beim menschlichen Beobachter kommt. Zunächst einmal bestrahlt eine Lichtquelle das betrachtete Objekt. Dieses absorbiert einen Teil des auftreffenden Lichtspektrums und reflektiert den Rest zum Auge des Betrachters. Bis jetzt hatten wir es mit rein physikalischen Vorgängen zu tun. Nun kommen Physiologie und Chemie ins Spiel, denn 3 Arten von lichtempfindlichen Rezeptoren in der Netzhaut des Auges werden durch den photometrischen Reiz stimuliert und erzeugen eine Erregung (excitation), die zur weiteren Verarbeitung über den Sehnerv an das Gehirn weitergeleitet wird. Die letztendliche Wahrnehmung der Farbe als Empfindung wird von der Psychologie (Prägungen, emotionale Begleitumstände ...) beeinflusst.

### Farbmessung

In der DIN 5033 Blatt 1 wird definiert: „Die Ermittlung der drei eine

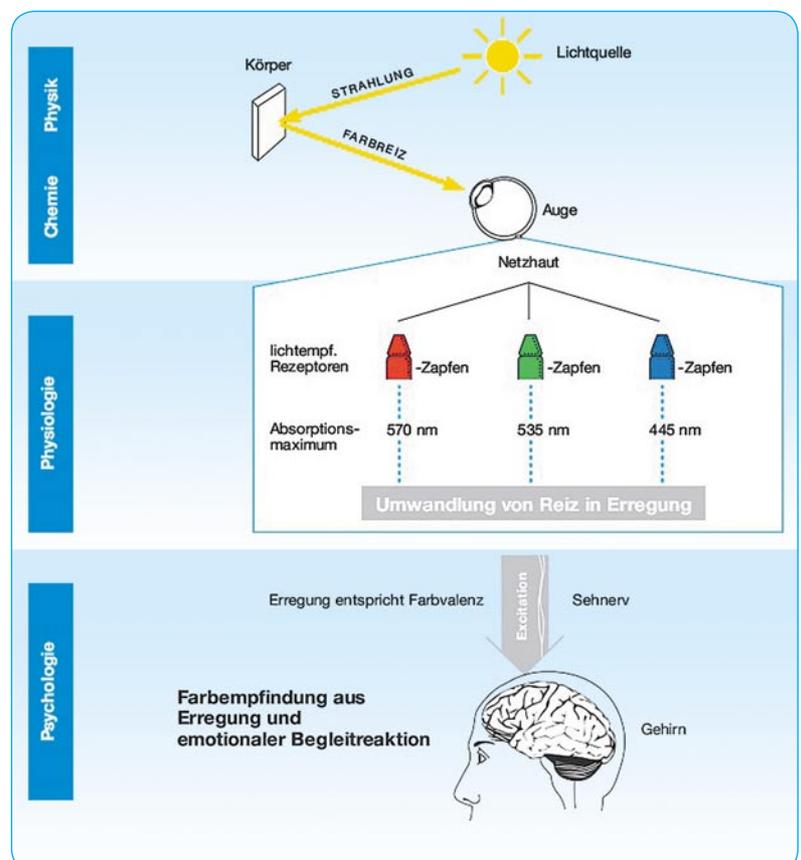


Bild 1: Sehen als physikalisch-biologischer Vorgang in der Übersicht. Quelle: Hubergroup

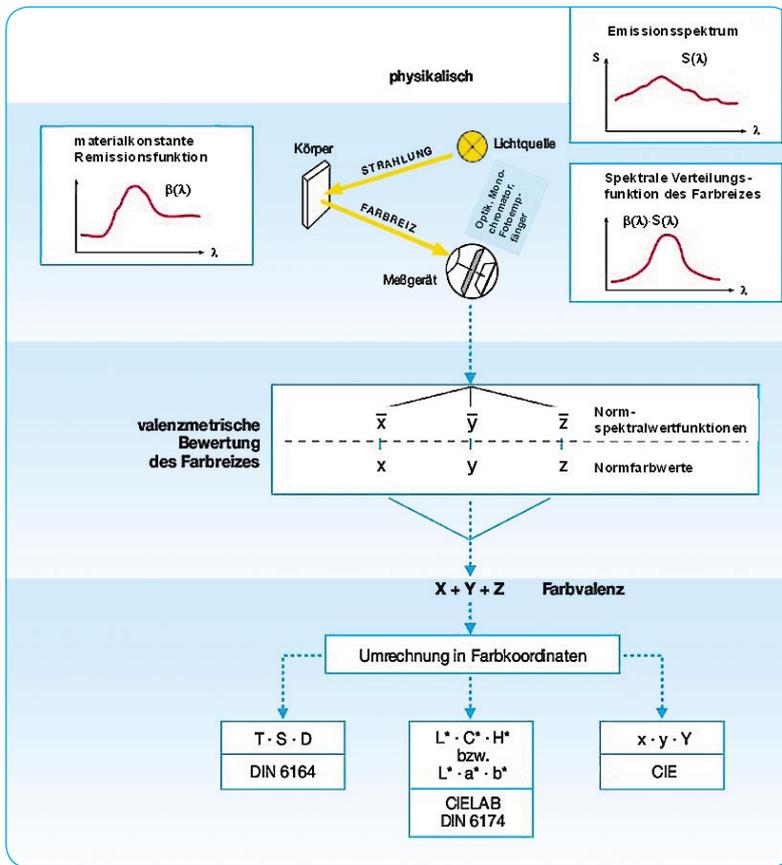


Bild 2: Licht- und Farbmessung für reproduzierbare numerische Aussagen. Quelle: Hubergroup

Farbvalenz kennzeichnenden Maßzahlen (Farbmaßzahlen) heißt Farbmessung. Deshalb sind die Farbvalenzen Gegenstand der Farbmessung. Exakte („valenzmetrische“) Farbmessverfahren müssen die Farbvalenzen a) umkehrbar eindeutig, b) ohne Rücksicht auf die spektrale Beschaffenheit der Farbreizfunktion und c) gemäß dem Normalbeobachter bewerten. Das Ziel ist also eine zahlenmäßige Bestimmung einer Farbvalenz und nicht die einer Farbpempfindung.“

Für die reproduzierbare Messbarkeit von Farben geht man wie in Bild 2 zusammengefasst vor. Am Wichtigsten dabei ist der Messempfänger. Er ermittelt die vom Objekt empfangenen Spektralfarben und übergibt sie zur Auswertung an einen Rechner, der daraus numerische Farbwerte bildet.

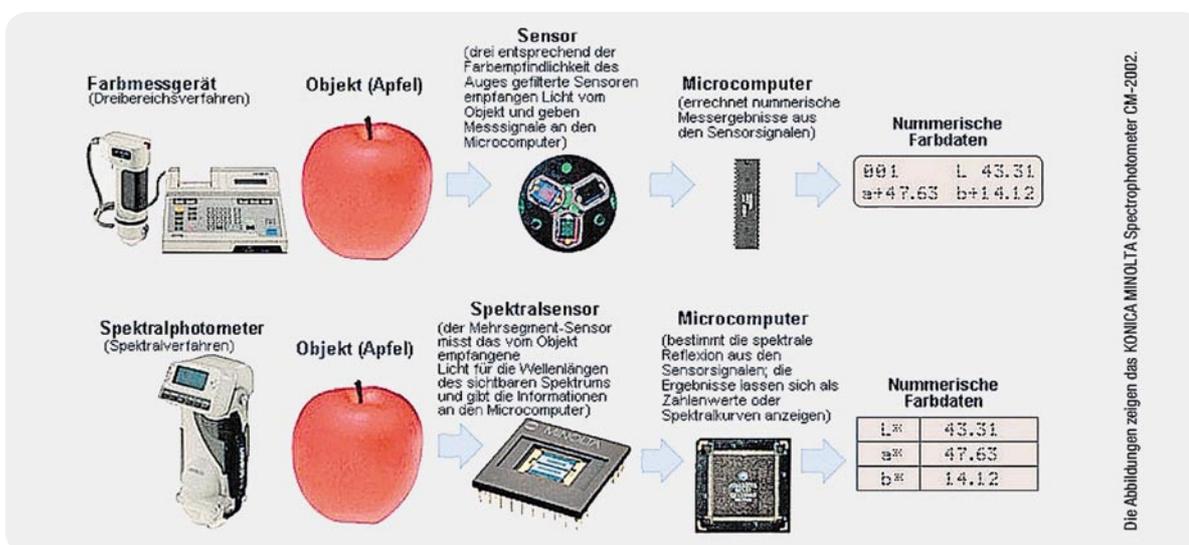
Bei der Farbmessung kommen im Wesentlichen zwei Verfahren zum Einsatz: das Dreibereichsverfahren und das Spektralverfahren (Bild 3).

Beim **Dreibereichsverfahren** empfangen drei entsprechend der Farbpempfindlichkeit des Auges gefilterte Sensoren eines Colorimeters das vom Objekt reflektierte Licht und geben diese Messsignale an die Auswerteelektronik (Mikroprozessor). Dreibereichsfarbmessgeräte sind preiswert, portabel und einfach zu bedienen. Sie werden hauptsächlich zur Farbdifferenzmessung eingesetzt.

Beim **Spektralverfahren** wird das vom Objekt empfangene Licht von einem Spektrophotometer in die Wellenlängen des sichtbaren Spektrums aufgelöst und zur weiteren Auswertung bereitgestellt. Das Messergebnis kann auch als Spektralkurve grafisch dargestellt werden, die beschreibt, wie stark das Objekt die einzelnen Spektralanteile reflektiert. Ein Spektrophotometer zeichnet sich durch hohe Messgenauigkeit und Vielseitigkeit, aber auch einen höheren Preis aus. Es ermöglicht komplexe farbmetrische Auswertungen und kann metamerische Effekte erfassen. Darunter versteht man das Phänomen, dass zwei Farben unter der einen Lichtquelle gleich, unter einer anderen voneinander abweichend erscheinen.

### Das CIE-Farbmesssystem

Das menschliche Auge bewertet die Abstrahlung einer Lichtquelle oder eines reflektierenden Objekts mit den Normspektralwertfunktionen der drei Zapfenarten (Bild 4). Die Ermittlung der Normspektralfunktionen geht auf Messreihen der Commission Internationale de l'Eclairage (CIE, Internationale Beleuchtungskommission) im Jahre 1931 zur Schaffung eines international gültigen Farbmetriksystems auf der Grundlage der Normfarbwerte Rot (R = 700,0 nm), Grün (G = 546,1 nm) und Blau (B = 435,8 nm) zurück. Eine statistisch relevante, normal farbsichtige Gruppe von Versuchspersonen musste dazu unter kontrollierten Verhältnissen Spektralfarben möglichst genau durch eine geeignete Mischung von Licht der drei CIE-Normfarbwerte R, G und B nachbilden. Dazu wurden ihnen die Farbproben in einem 2° großen Winkelsegment des Gesichtsfelds (entspricht einem Probendurchmesser von 1,75 cm bei einem Betrachtungsabstand von 50 cm, typisch für eine Lesesituation) vorgelegt, woraus



Die Abbildungen zeigen das KONICA MINOLTA Spectrophotometer CM-2002.

Bild 3: Sehen als physikalisch-biologischer Vorgang in der Übersicht. Quelle: Konica Minolta

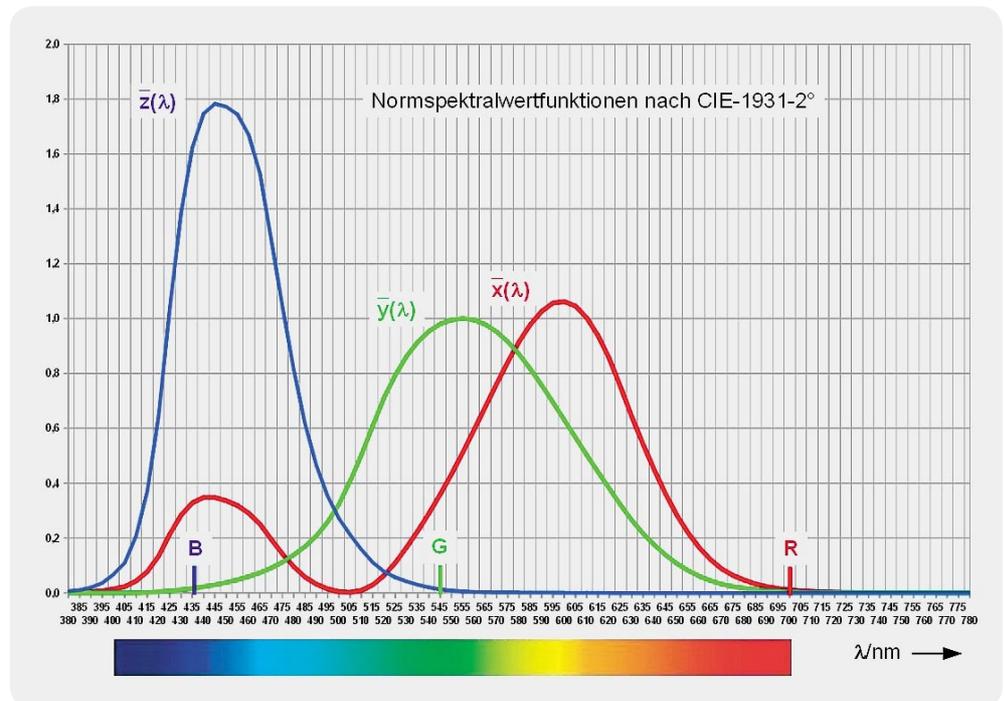


Bild 4: Die Normspektralwertfunktionen des menschlichen Auges werden auch Augenempfindlichkeitskurven genannt, weil sie die spektrale Sensibilität der drei Zapfenarten für das Farbsehen charakterisieren.

der Name des Verfahrens CIE-1931-2° resultiert. 1964 wurde mit CIE-1964-10° für eine verbesserte Praxisnähe das Gesichtsfeld des Normalbeobachters auf 10° aufgeweitet. Die numerischen Unterschiede zwischen den Messreihen beider Verfahren sind gering.

Die von den Probanden gewählten Einstellwerte wurden gemittelt und interpoliert und führten zu den RGB-Spektralwertfunktionen in Bild 5. Die vom menschlichen Beobachter empfundene Farbe eines beleuchteten Objekts hängt davon ab, wie sich das von diesem reflektierte Licht auf die Normspektralwertfunktionen (auch als Augenempfindlichkeitskurven bezeichnet) verteilt.

Man erkennt, dass sich mit den drei RGB-Primärfarben der CIE-1931-2° nicht alle Spektralfarben durch additive Mischung erzeugen lassen. Für einige Spektralfarben müsste mindestens eine Spektralwertzahl negative Werte annehmen können. Damit alle reellen Farben durch rein additive Mischung darstellbar sind, kann man RGB-Spektralwertfunktionen  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$  und  $\bar{b}(\lambda)$  mit einer Lineartransformation gemäß Gleichung 1 in Normspektralwertfunktionen  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  und  $\bar{z}(\lambda)$  überführen.

$$\begin{aligned}\bar{x}(\lambda) &= 0,49 \cdot \bar{r}(\lambda) + 0,31 \cdot \bar{g}(\lambda) + 0,20 \cdot \bar{b}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) &= 0,17697 \cdot \bar{r}(\lambda) + 0,81240 \cdot \bar{g}(\lambda) + 0,01063 \cdot \bar{b}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) &= 0,00 \cdot \bar{r}(\lambda) + 0,01 \cdot \bar{g}(\lambda) + 0,99 \cdot \bar{b}(\lambda)\end{aligned}$$

Gleichung 1

Eine Tabelle mit den exakten Werten der Normspektralwertfunktionen für den CIE-1931-2°- und den CIE-1964-10°-Beobachter findet man auf der Internetseite der CIE (<http://files.cie.co.at/204.xls>). Die Tabellenwerte für den 1931-2°-Beobachter wurden mit dem Tabellenkalkulationsprogramm OpenOffice Calc in die Kurven in Bild 4 umgesetzt.

Die Normspektralwertfunktionen beschreiben, wie die drei CIE-Normfarbwerte zu mischen sind, um eine bestimmte Spektralfarbe nachzubilden. So kommt z. B. der durch eine Spektralfarbe mit einer Wellenlänge von 500 nm erzeugte Farbreiz aus der Überlagerung von  $\bar{x}(500 \text{ nm}) + \bar{y}(500 \text{ nm}) + \bar{z}(500 \text{ nm})$  zustande.

Es erstaunt, dass die gewählten Farbvalenzen aus drei festen monochromen Farben R, G, B farbgleich wie die nachzubildende beliebige Spektralfarbe empfunden werden. Aber darin zeigt sich, dass das Auge und die dahinter liegende „Signalverarbeitung“ (Gehirn) relativ leicht zu täuschen sind.

Als weiteren Beleg dafür betrachten wir Bild 6. Der darin gezeigte Effekt wird als Wasserfarben-Illusion bezeichnet. Der Name leitet sich ab aus der Empfindung des Betrachters, die Fläche zwischen den Farbkonturen sei wie mit einer leichten, gleichfarbigen aquarellartigen Füllung

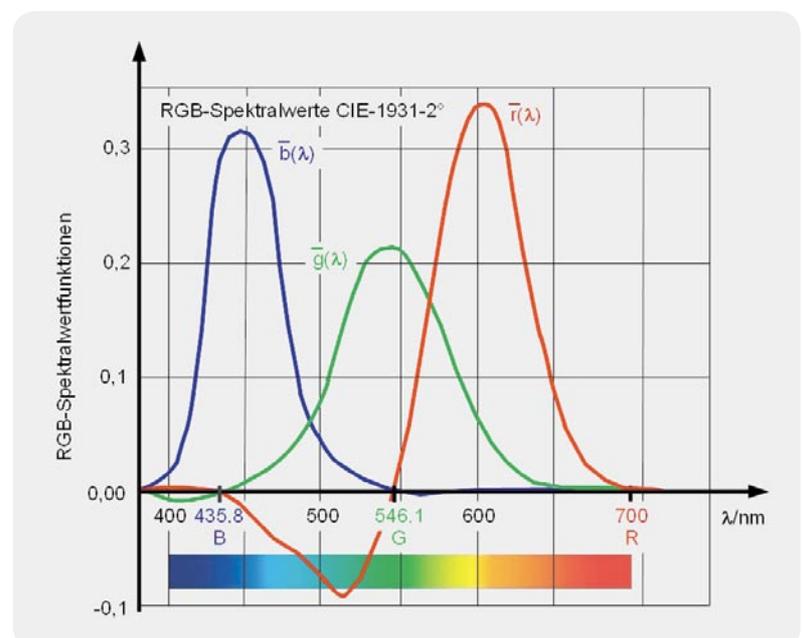


Bild 5: Diese Funktionen für die Intensität von drei Lichtquellen mit je einer diskreten Farbe ergaben sich aus den Testreihen des CIE 1931.

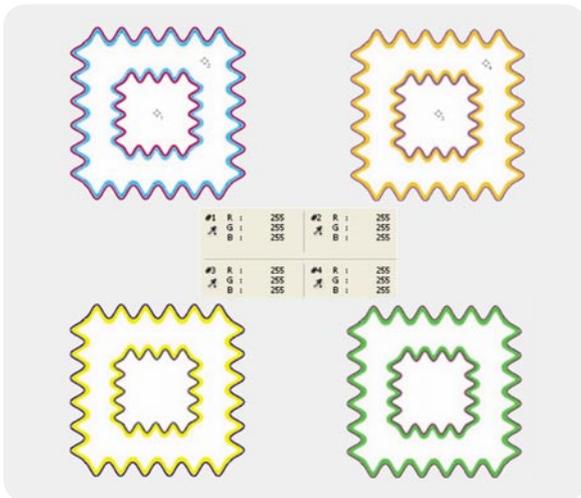


Bild 6: Ist die Fläche zwischen den farbigen Konturen leicht in den Konturfärbungen eingefärbt? Subjektiv ja, objektiv nein, wie die Farbmessung beweist.

belegt. Die Farbmessungen 1 bis 4 belegen, dass dies nicht der Fall ist. Ein weiteres Beispiel, das verdeutlicht, dass die Wahrnehmung einer Farbe keinesfalls objektiv ist, zeigt Bild 7. Bei eingehender Betrachtung scheint der rechte rote Ring vor blauem Hintergrund „leuchtender“ als der linke in gelbem Umfeld. Dies ist ein kontrastabhängiger subjektiver Effekt, denn die Ringfarben sind identisch.

Mit den Spektralfunktionen aus Gleichung 1 werden 2°-Normfarbwerte  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  gemäß Gleichung 2 gebildet. Sie können für Blickwinkel bis 4° eingesetzt werden und sind nicht für leuchtende Flächen (Körperfarben) anwendbar. Der Normfarbwert  $Y$  hängt von der Normspektralwertfunktion  $\bar{y}(\lambda)$  ab, die der Hellempfindlichkeit des Auges entspricht. Daher ist  $Y$  ein Maß für die Helligkeit einer Farbe. Die Normierungskonstante  $K$  ist so gewählt, dass für einen vollkommen mattweißen (d. h. ideal streuenden) Körper bei jeder Lichtart stets  $Y = 100$  wird.

#### Normfarbwerte XYZ (CIE 1931)

$$X = K \cdot \int_{\lambda=380\text{nm}}^{780\text{nm}} \frac{S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} d\lambda$$

$$Y = K \cdot \int_{\lambda=380\text{nm}}^{780\text{nm}} S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = K \cdot \int_{\lambda=380\text{nm}}^{780\text{nm}} S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

$$K = \frac{100}{\int_{\lambda=380\text{nm}}^{780\text{nm}} S(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

mit

$S(\lambda)$ : Strahlungsfunktion (relative spektrale Energieverteilung der Beleuchtung)

$R(\lambda)$ : spektrale Reflexion der Probe

$\varphi(\lambda) = S(\lambda) \cdot R(\lambda)$ : Farbreizfunktion

$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ : Spektralwertfunktionen für den 2°-Normalbetrachter

Gleichung 2

Die CIE-1931-2° zugrunde liegenden Normfarbwertzahlen  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  werden auf das Intervall  $[0...1]$  normiert und man erhält die CIE-Normfarbwertanteile  $x$ ,  $y$  und  $z$  (Gleichung 3).

#### CIE – Normfarbwertanteile

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

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

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} = 1 - x - y$$

mit  $x + y + z = 1$

Gleichung 3

Wegen  $x + y + z = 1$ , genügt es, zwei CIE-Normfarbwertanteile anzugeben, um die Zusammensetzung jeder Farbe auszudrücken.

#### CIE-Norm-Farbdiagramm

Trägt man die  $x$ - und  $y$ -Farbkoordinaten aller sichtbaren Spektralfarben rechtwinklig gegeneinander auf, entsteht eine gekrümmte, offene Kurve. Durch die Verbindung zwischen Rot und Purpur (Purpurgerade) wird sie geschlossen. Die umfasste Fläche („Schuhsohle“) heißt CIE-Normfarbtabelle (Bild 8). Sie enthält die Farborte aller reellen Farben. Bei  $x = y = z = 0,33$  liefern alle drei Rezeptorarten des Auges den gleichen Reiz, was als Lichtfarbe Weiß empfunden wird (Unbuntpunkt, Weißpunkt). Mit der ergänzenden Angabe von  $Y$  entsteht das Wertetripel  $x, y, Y$ , das sowohl Farbe (Chromazität:  $x, y$ ) als auch deren Helligkeit (Luminanz:  $Y$ ) beschreibt.

Ohne auf alle Details der CIE-„Schuhsohle“ einzugehen, wollen wir ihre wichtigsten Eigenschaften kurz streifen. Auf der äußeren umlaufenden Kontur (Spektralfarbenzug) wird der reine spektrale Farbton in höchster Sättigung von 380 nm (Purpur) bis 780 nm (Rot) abgebildet, in Richtung zum Weißpunkt nimmt seine Sättigung bis auf null ab. Unter Sättigung können wir also den Unterscheidungsgrad des farbigen Reizes von einem achromatischen (farblosen) Reiz verstehen.

Nun ist es aber so, dass der Weißpunkt bei Licht, welches von der spektralen Zusammensetzung des Tageslichts abweicht, seine Lage in der CIE-„Schuhsohle“ verändert. Unter Glühlampenlicht (Normlichtart A) sehen ein Weiß und alle anderen Farben eben anders aus als an einem Nordfenster bei bedecktem Himmel (Normlichtart D65, mittleres Tageslicht). Deshalb wird

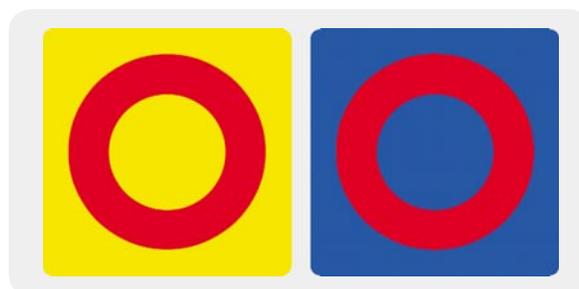


Bild 7: Kontraste beeinflussen die Farb Wahrnehmung.

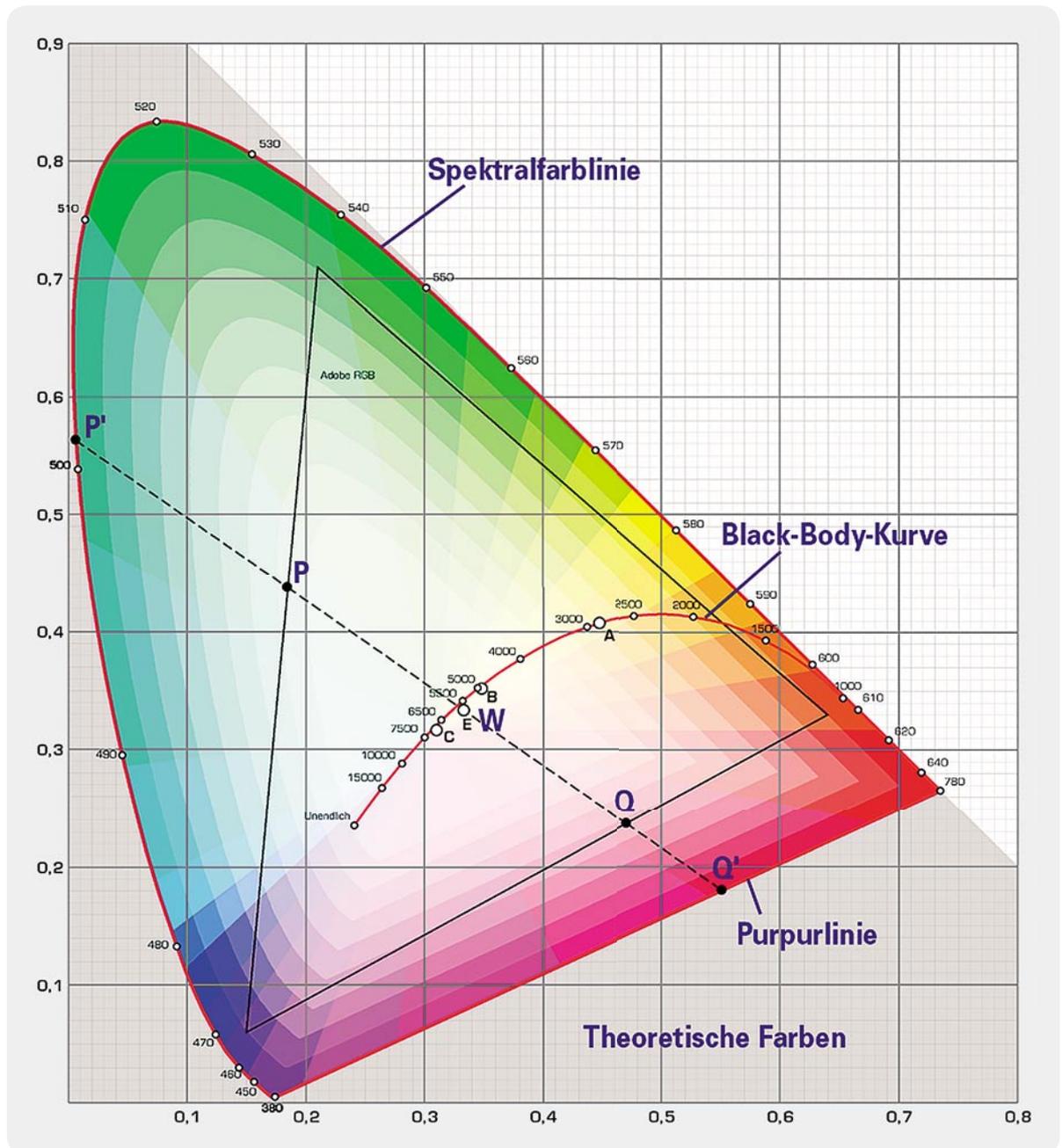


Bild 8: Die CIE-Normfarbtabelle präsentiert über CIE-Normfarbwertanteile  $x$ ,  $y$  alle reellen Farben nach Farbton und Farbsättigung. Sie gibt keine Auskunft über die Helligkeit einer Farbe ( $Y$ : Luminanz). Quelle: Wikipedia

man in guten Modehäusern mit der Textilie, für die man sich interessiert, auch an ein nördliches Tageslichtfenster geführt, um einen „objektiven“ Eindruck von deren Farbwirkung zu erhalten. Um bei der Farbbewertung vom Tageslicht unabhängig zu sein, wurden künstliche Lichtquellen mit reproduzierbaren Eigenschaften entwickelt (Normlichtquellen).

Für die Charakterisierung des von einem Leuchtmittel abgegebenen Lichts als „kalt“ oder „warm“ ist die beleuchtungsabhängige Lage des Weißpunkts ausschlaggebend. Die Linie aller Weißpunkte ergibt sich aus der Farbe eines Schwarzen Körpers (black body) bei verschiedenen Farbtemperaturen von roten über gelbe zu blauen Farborten und heißt deshalb auch „Black-Body-Kurve“.

### Schwarzer Strahler

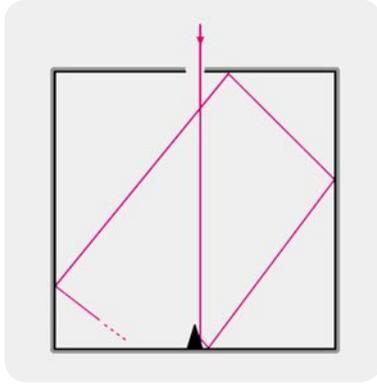
Unter einem Schwarzen Körper (Schwarzer Strahler) versteht man die Idealisierung eines Gebildes (Kohlenstoff in seiner graphitischen Form kommt bis auf drei Prozent an das Ideal heran), das auftreffende elektromagnetische Strahlung, unabhängig von deren spektraler Zusammensetzung (also auch Licht) vollständig verschluckt. Somit ist ein Schwarzer

Körper auch völlig undurchlässig und ohne jegliche Reflexion (Spiegeln, Streuen), eben ein perfekter Absorber. Die absorbierte Strahlungsenergie führt zu einer Erhöhung seiner thermischen Energie (Körperwärme), die er vollständig als Strahlung abgibt.

Eine Realisierung, die einem idealen Strahler bereits recht nahe kommt, ist ein auf der Innenseite beruhter Kasten mit einer kleinen Eintrittsöffnung für die Strahlung (Licht), wie ihn Bild 9 zeigt. Parallel und schräg zu den Seitenwänden einfallende Lichtstrahlen werden mehrfach an den Innenwänden jeweils unter Absorption eines Teils ihrer Energie reflektiert und finden nicht mehr heraus. Mit anderen Worten: Der Kasten hat sie verschluckt, wie es ein Schwarzer Strahler tun soll.

Intensität und spektrale Verteilung der Abstrahlung war erst durch das von Max Planck um 1900 empirisch aufgestellte Strahlungsgesetz berechenbar. Da-

Bild 9: Das Modell eines Schwarzen Strahlers. Licht, das durch die Öffnung auf der Oberseite eintritt, wird vollständig absorbiert und in thermische Emission über die Oberfläche umgesetzt.



rin ging Planck davon aus, dass elektromagnetische Strahlung nicht kontinuierlich, sondern „portionsweise“ in Quanten abgegeben oder aufgenommen wird. Diese Hypothese war die Geburtsstunde der Quantenmechanik und erlöste die Physiker von einer quälenden Frage. Nach dem Strahlungsgesetz von Rayleigh-Jeans nämlich, welches das Strahlungsverhalten eines Schwarzen Körpers bei niedrigen Frequenzen sehr gut beschreibt, aber mit steigender Frequenz zunehmend überzeichnet, müsste ein Schwarzer Körper, über alle Frequenzen integriert, eine unendlich große Energie abstrahlen („Ultraviolett katastrophe“). Die von Planck errechnete Strahlungsverteilung eines idealen Schwarzen Strahlers bei verschiedenen Temperaturen (Kelvin: K) zeigt Bild 10.

Man erkennt, dass die Intensität der Strahlung mit steigender Temperatur zunimmt und sich ihr spektrales Maximum in Richtung kürzerer Wellenlängen (höhere Frequenzen) verschiebt. Auf jeden Fall deckt sich ein Teil der Spektren mit dem Spektralbereich des sichtbaren Lichts und das Maximum des Strahlerspektrums

liegt nur zwischen Strahlertemperaturen von 5000 K bis etwa 7500 K im sichtbaren Bereich. Mit ansteigendem Maximum des Strahlungsspektrums eines Schwarzen Strahlers steigt seine Energie und umgekehrt. Bei 7500 K verlässt das spektrale Maximum den Bereich des sichtbaren Lichts und geht ins Ultraviolette. Unter 5000 K wandert das Maximum ins Infrarote.

Das Maximum des Spektrums eines Schwarzen Strahlers ergibt sich entsprechend dem Wien'schen Verschiebungsgesetz zu  $\lambda_{\max} = (0,002898 \text{ K})/T$ . Setzen wir z. B.  $T = 9000 \text{ K}$  ein, ergibt sich  $\lambda_{\max} = 322 \text{ nm}$ , was gut mit Bild 10 übereinstimmt.

Auf der Homepage von Matthias Borchardt ([www.mabo-physik.de/plancksche\\_strahlungskurve.html](http://www.mabo-physik.de/plancksche_strahlungskurve.html)) steht ein Programm (planck.exe) zum Download, das die Intensitätskurven der Strahlung als Funktion der Strahlertemperatur grafisch ausgibt.

**Fazit:** Als Farbtemperatur bezeichnet man diejenige Temperatur, die ein Schwarzer Körper haben müsste, damit dessen Licht einen möglichst ähnlichen Farbeindruck hervorruft wie die tatsächlich vorhandene Beleuchtung. „Warmes“ Licht ist demnach langwelliger als „kaltes“ Licht.

Richtwerte für einige Lichtquellentypen gibt die Tabelle in Bild 11.

In engem Zusammenhang mit der Farbsättigung stehen die Begriffe Farbigkeit oder Farbintensität als wahrgenommene „Buntheit“. Jeder kann aus persönlicher Anschauung nachvollziehen, dass die Beleuchtung von Farbflächen auf die Farbstärke Einfluss hat. Helle Beleuchtung führt zu einem intensiveren Farbeindruck als dunklere Beleuchtung. Im Extremfall, bei ganz schwachem Licht, ist gar kein Buntsehen mehr möglich, weil das Sehen von den empfindlicheren Schwarz-Weiß-Stäbchen in der Netzhaut anstelle der

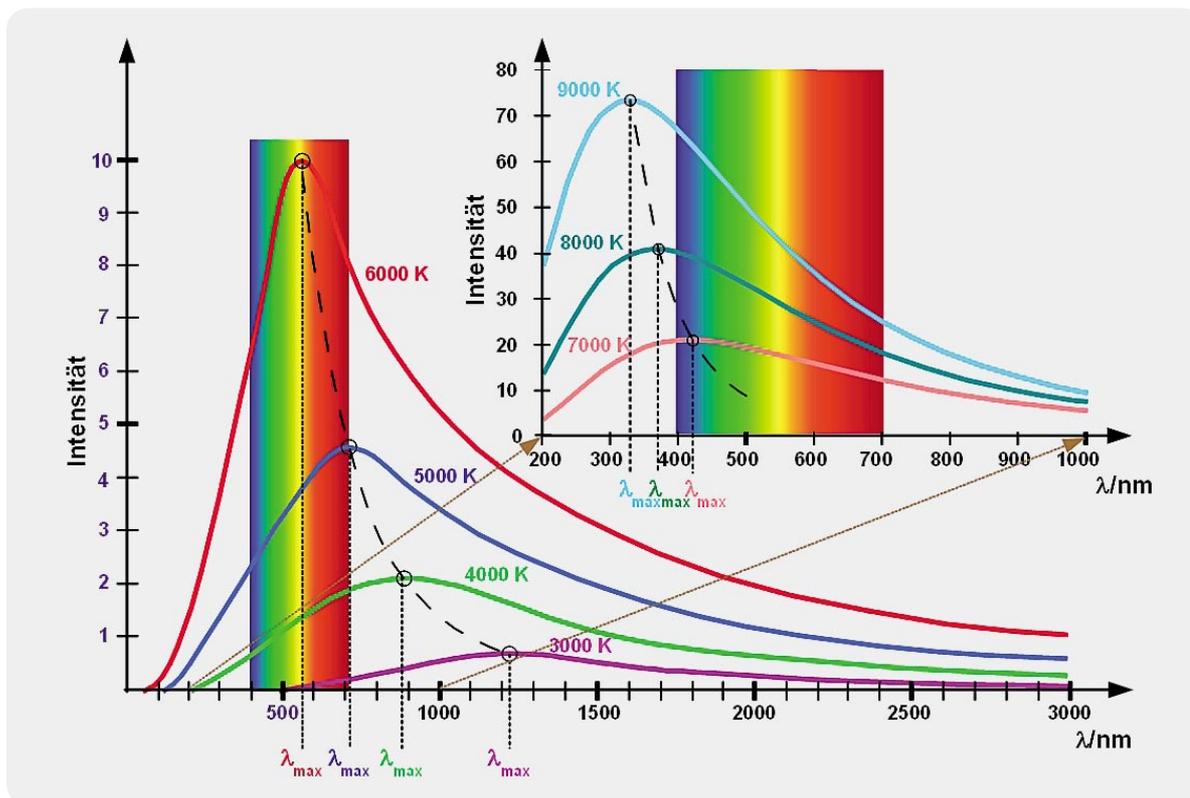


Bild 10: Die Strahlung des idealen Schwarzen Körpers hängt nur von dessen Temperatur ab.

drei Arten von Farb-Zäpfchen übernommen wird. Das Sprichwort „Nachts sind alle Katzen grau“ veranschaulicht dies.

Neben Farbton und Sättigung einer Farbe empfindet der Mensch deren Helligkeit als die dritte ihrer grundlegenden Eigenschaften. Der stärkste Unterschied besteht zwischen Schwarz und Weiß und bei den bunten Farben zwischen Violett und Gelb. Auf die Unterscheidung zwischen farbmetrischer und fotometrischer Helligkeit wollen wir an dieser Stelle nicht weiter eingehen. Es müssten dazu der Begriff „Vergleichsfarbe“ und das Weber-Fechner-Gesetz näher erläutert werden. Letzteres beschreibt den logarithmischen Zusammenhang zwischen wahrgenommener und gemessener Lichtintensität.

Es gibt neben dem CIE-System eine Vielzahl weiterer Farbmesssysteme, die hier aus Platzgründe nicht angesprochen werden können.

### Farbwiedergabeindex als Maß für die Beleuchtungsqualität

Als wichtiges Maß für die Fähigkeit des von einer bestimmten Beleuchtungsquelle ausgesandten Lichts, die Farben unterschiedlicher bestrahlter Objekte möglichst naturgetreu wiederzugeben, gilt der Farbwiedergabeindex CRI (Color Rendering Index). Er wurde von der CIE sinngemäß wie folgt definiert: „CRI: Wirkung eines Leuchtmittels auf die Farbanmutung von Objekten durch bewussten oder unbewussten Vergleich mit der Farbanmutung unter einer Referenzbeleuchtung.“

Als Referenz dient bis zu einer Farbtemperatur von 5000 K das Licht eines Schwarzen Strahlers mit der entsprechenden Farbtemperatur. Darüber hinaus bildet eine tageslichtähnliche Lichtquelle den Bezug (Quelle: Wikipedia). Der CRI beschreibt mit einem Wert zwischen 0 und 100 den Unterschied zwischen Ist- und Normbeleuchtung in Bezug auf die Farbwiedergabe und ist damit ein Maß für die Farbwiedergabetreue unter der zu beurteilenden Ist-Beleuchtung.

Ein Beispiel ohne wissenschaftlichen Anspruch entstand am Schreibtisch des Autors. Es zeigt einen Tesafilmabroller unter dem Licht einer energiesparenden Schreibtischlampe mit der Lichttemperaturangabe 2700 K und einer Taschenlampe mit 9 im blau-weißen Bereich Licht emittierenden Dioden (Bild 12). Man erkennt deutlich, dass das mit stärkeren Rotanteilen ausgestattete Schreibtischlampenlicht zu einem intensiveren Rot und einer schwächeren Wahrnehmung des Blauanteils im Bild führt, wogegen die blautichige Taschenlampe das Blau deutlich hervorhebt und das Rot im Bild zurücknimmt.

### CRI-Messverfahren

In der DIN 6169 sind 14 Testfarben, von denen die ersten 8 nur schwach gesättigt sind, mit einem genormten Remissionsverlauf (Remission ist im Gegensatz zu spiegelnder Reflexion das diffuse Rückstrahlen, lateinisch: remittere = zurückschicken) definiert (Bild 13). Für jede dieser Farben kann nun ein spezifischer Farbwiedergabeindex  $R_1 \dots R_{14}$  berechnet werden. Wie dabei vorzugehen ist, beschreibt die CIE-Publikation 13.3-1995.1 „Method of Measuring and Specifying Color Rendering Properties of Light Source (1995)“. Die Berechnung des CRI ist nicht ganz einfach.

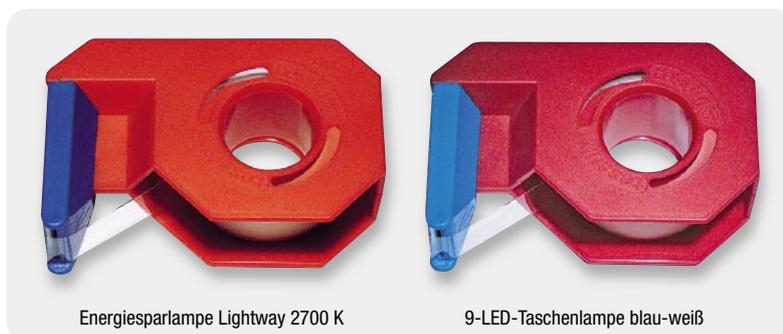


Bild 12: Unter dem Licht der Schreibtischlampe mit ausgeprägtem Rotanteil erscheint das Blau des Tesa-Rollers weniger leuchtend (links) als bei Beleuchtung mit kalt-blauem LED-Licht einer Taschenlampe (rechts). Für Rot gilt das Umgekehrte.

Lichtquelle	Farbtemperatur
Kerze	1500 K
Natriumdampflampe	2000 K
40-W-Glühlampe	2200 K
60-W-Glühlampe	2680 K
100-W-Glühlampe	2800 K
200-W-Glühlampe	3000 K
Halogenlampe	3000 K
Leuchtstofflampe (kaltweiß)	4000 K (diskontinuierlich)
Xenonlampe, Lichtbogen	4500 – 5000 K
Morgensonne, Abendsonne, D50-Lampe	5000 K
Sonne am Vor- und Nachmittag	5500 K
Elektronenblitzgerät	5500 – 5600 K
Sonne am Mittag bei Bewölkung	5500 – 5800 K
Tageslichtlampe	5600 – 7000 K
Bedeckter Himmel	6500 – 7500 K
Nebel	7500 – 8500 K
Blauer Himmel kurz vor Sonnenaufgang oder kurz nach Sonnenuntergang (Blaue Stunde)	9000 – 12000 K

Bild 11: Typische Farbtemperaturen verschiedener Lichtquellen (Quelle: Wikipedia)

Der Ablauf ist z. B. in dem Dokument [www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/AR-SpecifyColorRec-March2010.pdf](http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/AR-SpecifyColorRec-March2010.pdf) auf den Seiten 12 bis 17 ausführlich dargestellt.

Ein zusammenfassender Wert ist der allgemeine Farbwiedergabeindex  $R_a$ , der als arithmetischer Mittelwert den Durchschnitt aus den Farbwiedergabeindizes  $R_1$  bis  $R_8$  bildet (Gleichung 4). Er wird meist mit CRI gleichgesetzt.

$$R_a = \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^8 R_i$$

Gleichung 4

### Die 14 Testfarben nach DIN 6169



Bild 13: Für jede dieser 14 Normfarben lässt sich ein Farbwiedergabeindex berechnen. Aus den ersten 8 Farben ergibt sich der allgemeine Farbwiedergabeindex als Mittelwert aus den Einzelwerten.

Eine Übersicht der mit bestimmten Lichtquellen erreichbaren Farbwiedergabeindizes gibt die Tabelle in Bild 14. Beim Licht einer 60-W-Glühlampe mit einer Farbtemperatur von etwa 2700 K ergibt sich ein allgemeiner Farbwiedergabeindex von 100, die Farbwiedergabe ist also optimal. Überhaupt keine Farbunterscheidung erlaubt eine Beleuchtung durch eine monochrome Lichtquelle wie eine Natrium-Niederdrucklampe. Dementsprechend kann der Farbwiedergabeindex sogar negative Werte annehmen.

Problematisch sind Farben mit einer ungleichmäßigen spektralen Intensitätsverteilung. So liegt der CRI heutiger im Markt erhältlicher weißer Leuchtdioden (LED: Light Emitting Diode) bei 70. Ihr Licht wird von einem blauen InGaN-Chip (Indium-Gallium-Nitrid) erzeugt, der mit gelbem Phosphor ummantelt ist, der einen Teil des blauen Lichts in gelbes umwandelt. Die Mischung aus blauem und gelbem Licht wird vom menschlichen Auge als kühles Weiß wahrgenommen. Wegen des schwachen Rotanteils kann mit kaltweißen LEDs nur ein CRI von etwa 70 erreicht werden.

Ein Rotanteil kann auf zwei Arten erhöht werden:

1. Hinzufügen von rotleuchtendem Phosphor in die LED-Umhüllung. Der Vorteil dieser Lösung besteht in der unveränderten Ansteuerung, nachteilig ist eine Reduzierung der Leuchtkraft um typ. 10 %.
2. Ergänzung der kaltweißen LED durch eine oder mehrere benachbarte rotleuchtende LEDs. Vorteil: Die Mischfarbe enthält dann einen erhöhten Rotanteil im Spektrum (Bild 15). Dieser ist durch die Ansteuerung der Dioden in gewissen Grenzen variabel. Nachteil: erhöhter Aufwand an Dioden und Ansteuerungselektronik.

Lichtquellen, die auf der Entladung von Leuchtgasen beruhen, haben im Gegensatz zu Leuchtstofflampen ein ausgeprägtes Linienspektrum und daher einen weniger hohen Farbwiedergabeindex (Bild 16).

### Kritik am CRI

Der Farbwiedergabeindex ist kein eindeutiges Maß für die Farbtreue. Ein hoher CRI bedeutet keinesfalls immer, dass alle Farben gut wiedergegeben werden. Tatsächlich können Lichtquellen mit signifikant anderer spektraler Zusammensetzung als die Referenzquelle den gleichen CRI aufweisen, obwohl sie eine stark abweichende Farbwirkung des bestrahlten Objekts hervorrufen.

Lampe	Index R <sub>a</sub>
Glühlampe	bis 100
Leuchtstofflampe, weiß de Luxe	85 ... 100
Leuchtstofflampe, weiß	70 ... 84
LED, weiß	70 ... 95
Leuchtstofflampe	50 ... 90
Halogen-Metaldampf Lampe	60 ... 95
Natriumdampf-Hochdrucklampe, warmweiß	80 ... 85
Quecksilberdampf-Hochdrucklampe	45
Natriumdampf-Hochdrucklampe, Standard	18 ... 30
Natriumdampf-Hochdrucklampe, farbverbessert	60
Natriumdampf-Niederdrucklampe	-44

Bild 14: Einige Lichtquellen und ihr Farbwiedergabeindex. Quelle: Wikipedia

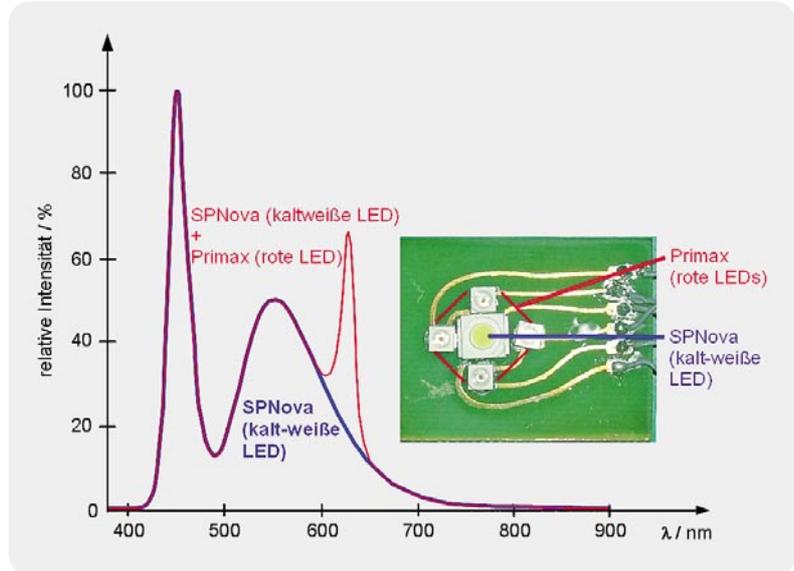


Bild 15: Durch Hinzufügen von rot leuchtenden Leuchtdioden lässt sich der schwache Rotanteil einer kalt-weißen LED etwas kompensieren. Quelle: Dominant Opto Technologies

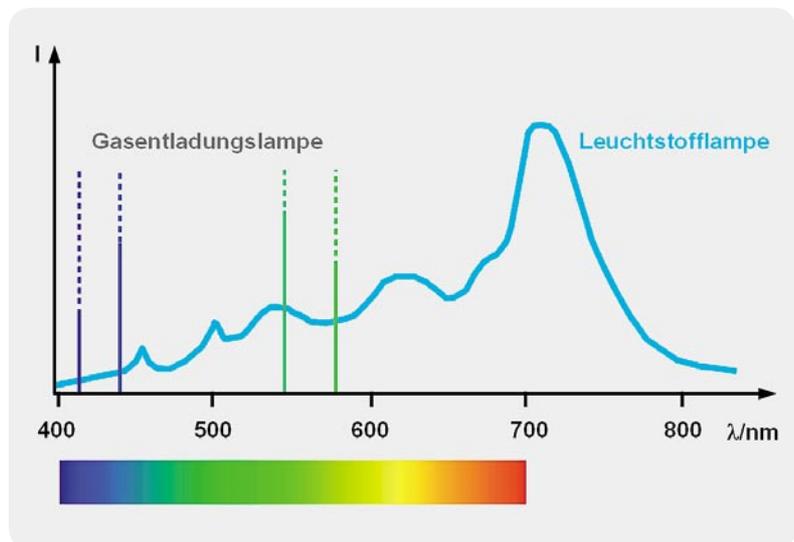


Bild 16: Licht von Gasentladungslampen hat ein Linienspektrum.

Das CIE und verschiedene andere Organisationen arbeiten an einem eindeutigeren Maß für die Charakterisierung der Farbwiedergabe von Lichtquellen. Bis dahin ist der CRI die allgemein akzeptierte Beschreibungsgröße für die Farbqualität einer Lichtquelle oder Beleuchtung.

### Zusammenfassung

Einfluss auf den Farbeindruck haben eine Vielzahl von messbaren und subjektiven Einflussgrößen: spektrale Reflexionseigenschaften des Sehobjekts, spektrale Verteilung (Farbton) der Beleuchtung und ihre Intensität (Helligkeit), Stimmungen, Umfeld und manches mehr. **ELV**



### Weitere Infos:

[www.cie.co.at](http://www.cie.co.at)  
[de.wikipedia.org/wiki/CIE-Normvalenzsystem](http://de.wikipedia.org/wiki/CIE-Normvalenzsystem)  
[cvrl.ioo.ucl.ac.uk](http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk)  
[www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/AR-SpecifyColorRec-March2010.pdf](http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/AR-SpecifyColorRec-March2010.pdf)