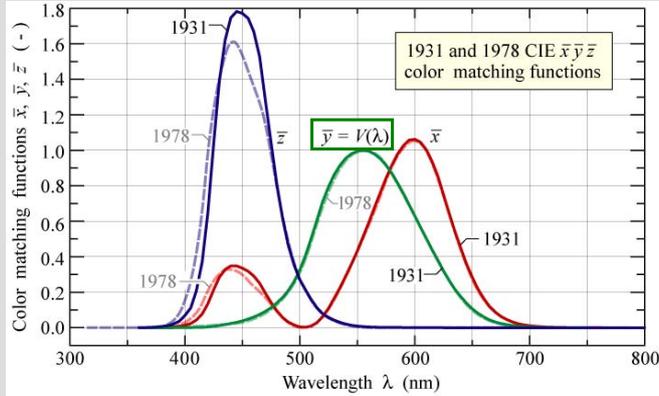


Farbanpassungsfunktionen

1

Licht verursacht unterschiedliche Anregung der drei Farbzäpfchen



CIE (1931) and CIE (1978) $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ color matching functions (CMFs). The \bar{y} CMF is identical to the eye sensitivity function $V(\lambda)$. Note that the CIE 1931 CMF is the currently valid official standard.

- Farbanpassungsfunktionen \bar{x} \bar{y} \bar{z} sind ähnlich den spektralen Empfindlichkeiten der Zäpfen
- Vorsicht: Es gibt jedoch verschiedene Standart für diese Farbmischungsfunktionen

apl.Prof. Dr. D.J. As

X, Y, Z Tristimulus Werte

2

Optische Leistung einer Lichtquelle: $P = \int_{\lambda} P(\lambda) d\lambda$

Tristimulus Werte X, Y und Z: $X = \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda) P(\lambda) d\lambda$

$$Y = \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda) P(\lambda) d\lambda$$

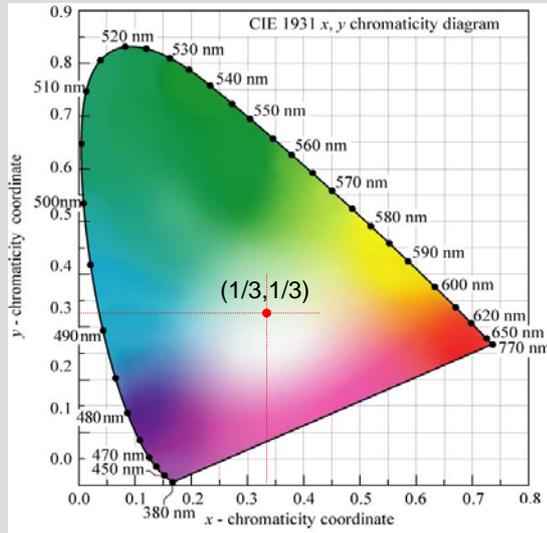
Farbanpassungsfunktion

Farbdiagramm (Chromaticity diagram) und Farbkoordinaten (chromaticity coordinates) x, y

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

Die z Farbkoordinate wird nicht benötigt, da $x+y+z=1$

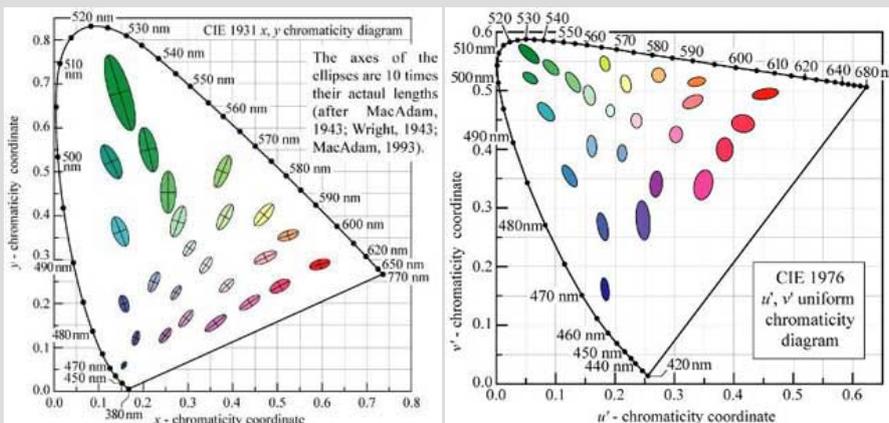
apl.Prof. Dr. D.J. As



CIE 1931 (x,y) chromaticity diagram. Monochromatic colors are located on the perimeter and white light is located in the center of the diagram.

Equal energy point: (x,y,z)=(1/3, 1/3, 1/3)

MacAdam analysierte die Farbdifferenz eng benachbarter Punkte im Farbdiagramm. Für einen wahrnehmbaren Farbunterschied muss eine minimale geometrische Distanz vorhanden sein. Farben innerhalb der elliptischen Bereiche erscheinen identisch.



- Innerhalb der MacAdam Ellipsen kann keine Farbdifferenz wahrgenommen werden
- Die Ellipsenachsen sind 10 mal größer als in Realität
- Der Mensch kann ca. 50000 verschiedene Farben wahrnehmen

Im Farbdigramm ist es wünschenswert wenn die Farbunterschiede proportional zu geometrischen Distanzen sind. Dies motiviert die Einführung vereinheitlichter Farbkoordinatensysteme (u,v) bzw. (u',v').

$$u = \frac{4X}{X+15Y+3Z} \quad v = \frac{6Y}{X+15Y+3Z} \quad (\text{CIE, 1960})$$

und

$$u' = \frac{4X}{X+15Y+3Z} \quad v' = \frac{9Y}{X+15Y+3Z} \quad (\text{CIE, 1976})$$

Mit den Koordinaten x, y, und z gilt folgender Zusammenhang:

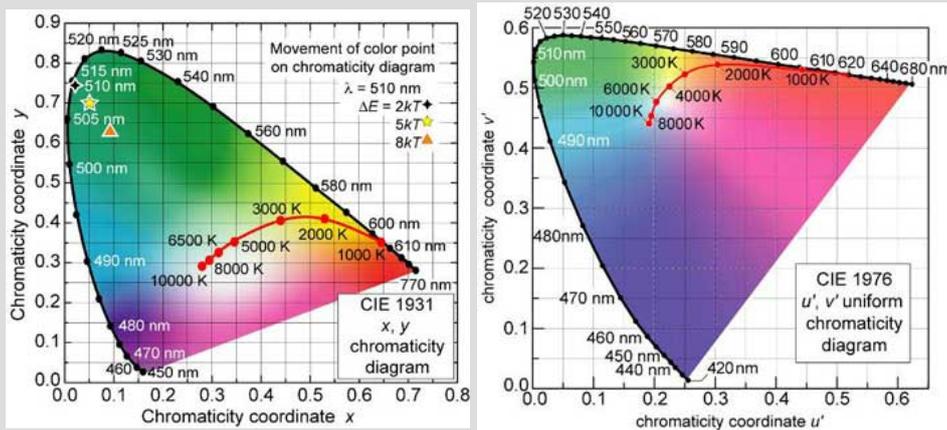
$$u = u' = \frac{4x}{-2x+12y+3} \quad v = \frac{6y}{-2x+12y+3} \quad v' = \frac{9y}{-2x+12y+3}$$

umgekehrt erhält man:

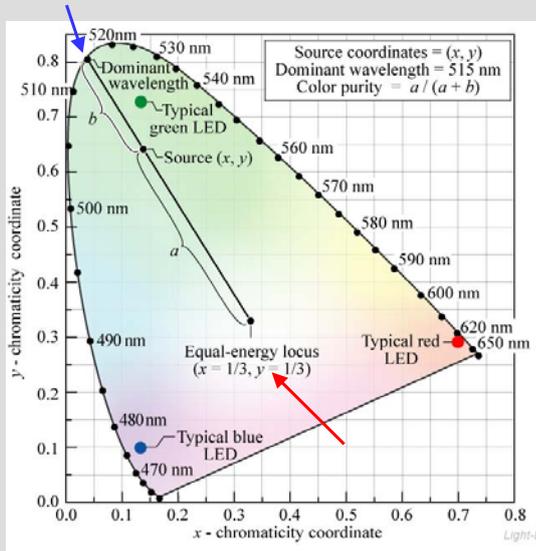
$$x = \frac{9u'}{6u' - 16v' + 12} \quad y = \frac{2v'}{3u' - 8v' + 6}$$

und

$$x = \frac{3u}{2u - 8v + 4} \quad y = \frac{2v}{2u - 8v + 4}$$



- Farbdigramme erlauben us die **Farbe zu quantifizieren**
- Farbtemperatur
- Planck'scher Strahler

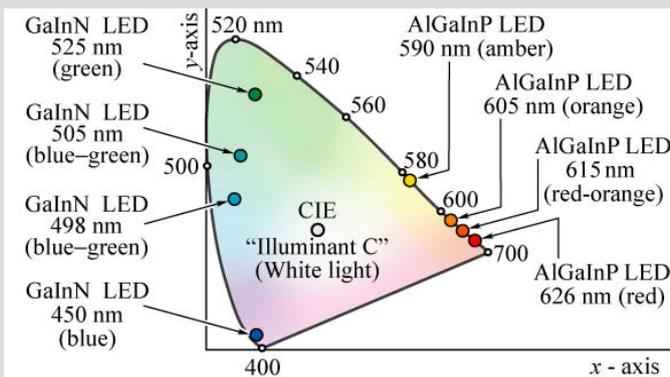


$$\text{Farbreinheit} = \frac{a}{a+b}$$

$$= \frac{\sqrt{(x-x_{ee})^2 + (y-y_{ee})^2}}{\sqrt{(x_d-x_{ee})^2 + (y_d-y_{ee})^2}}$$

↑ dominant wavelength
↑ equal energy locus

apl.Prof. Dr. D.J. As



Location of LED light emission on the chromaticity diagram (adopted from Schubert and Miller, 1999).

Bemerkung:

- rote und blaue LEDs liegen Nahe am Rand
- grüne LEDs sind nach innen verschoben
- Farbreinheit und Farbsättigung



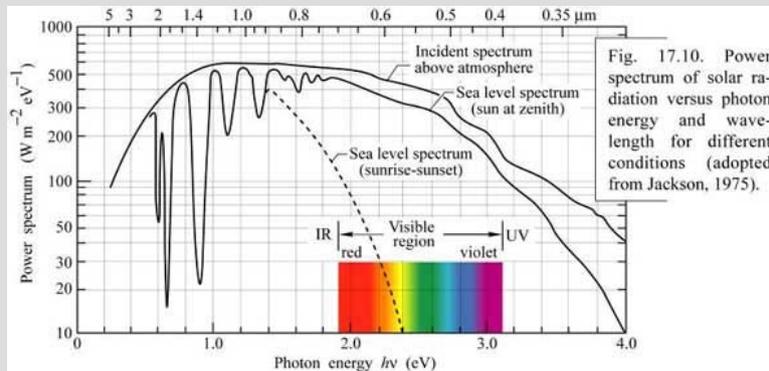
apl.Prof. Dr. D.J. As

In vielen Anwendungsbereichen spielen spezialisierte Modelle und deren Räume eine Rolle:

- RGB-Farbraum – Computermonitore, Internetstandard
- CMYK-Farbraum – e, Druck-Endstufe
- HSV-Farbraum mit den Varianten HSL, HSB, HSI – Design, Dokumentation von Malerei, Videokunst
- Lab-Farbraum – CIE-Farbdreieck
- LCh-Farbraum bezeichnet keinen Farbraum, sondern die Darstellung von HSV oder LAB in Polarkoordinaten
- l1l2l3-Farbraum – rechentechnisch optimierter Raum der Bildverarbeitung
- YCbCr-Farbmodell (manchmal kurz YCC genannt, vgl. unten) – digitales Fernsehen, sowohl digitales PAL als auch digitales NTSC, DVB, JPEG, MPEG, DVD-Video, u. a.
- YPbPr-Farbmodell – analoges HDTV, analoges Komponenten-Videokabel
- YUV-Farbmodell – analoges PAL und NTSC
- YIQ-Farbmodell – veraltet, früher verwendet bei analogem NTSC
- YCC-Farbmodell –Kodak Photo CD

Farbraumssysteme

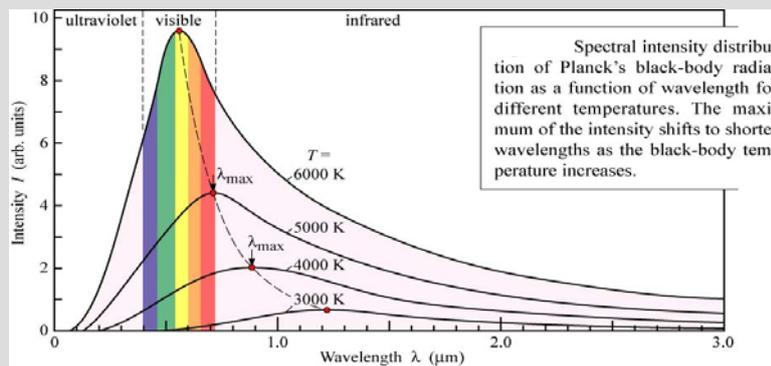
- CIExyz-Farbraumssystem (Chromatizitätskoordinaten)
- CIEYxy-Farbraumssystem (Chromatizitätskoordinaten)
- CIEYuv-Farbraumssystem
- CIEYu'v'-Farbraumssystem
- CIELuv-Farbraumssystem
- CIELaB-Farbraumssystem
- CIE-Normvalenzsystem



- Bemerkung: Es gibt viele Wege weißes Licht herzustellen
- Sonnenlicht ist kein effizienter Weg um Weißlicht herzustellen, da es von der Tageszeit, Jahreszeit, Höhe, Wetter und anderen Faktoren abhängt.

apl.Prof. Dr. D.J. As

Die Schwarzkörperstrahlung wird durch einen Parameter, nämlich der **Temperatur** charakterisiert



Planck'sche Strahlung:

$$I(\lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]}$$

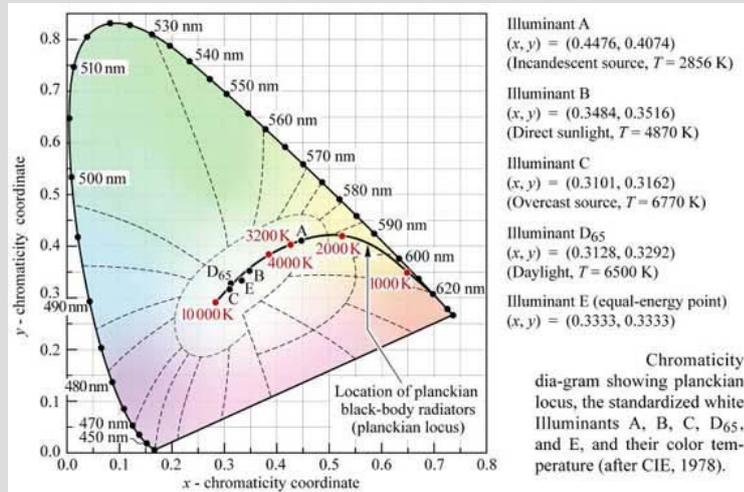
Wien'sches Verschiebungsgesetz

$$\lambda_{\max} = \frac{2880 \mu\text{mK}}{T}$$

apl.Prof. Dr. D.J. As

Farbtemperatur (x,y Koordinatensystem)

13

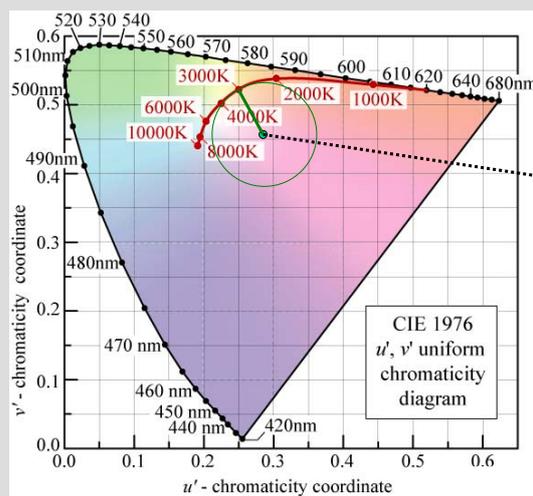


- Planck'sches Spektrum oder Schwarzkörperstrahlungsspektrum
- Mit zunehmender Temperatur glüht das Objekt zuerst rot, orange, gelb und dann weiß

apl.Prof. Dr. D.J. As

Farbtemperatur (u',v' Koordinatensystem)

14

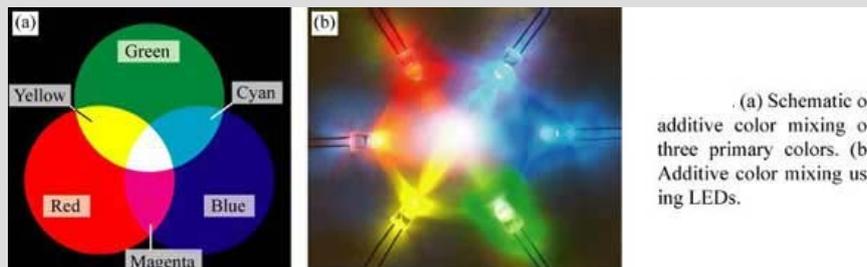


Die korrelierte Farbtemperatur dieser Lichtquelle ist 3000 K

Die einer Lichtquelle „korrelierte Farbtemperatur“ ist im vereinheitlichten (u',v') Farbdia-gramm, der Punkt der Planck'schen T-Kurve der der Lichtquelle am nächsten liegt (d.h. die kürzeste geometrische Distanz)

apl.Prof. Dr. D.J. As

Lichtquelle	Farbtemperatur
Kerze	1.500 K
Glühlampe (40 W)	2.680 K
Glühlampe (100 W)	2.800 K
Glühlampe (200 W)	3.000 K
Halogenlampe, Leuchtstoffröhre (Warmweiß)	3.000 K
Fotolampe Typ B, Halogenglühlampe	3.200 K
Fotolampe Typ A bzw. S, Spätabendsonne kurz vor Dämmerungsbeginn	3.400 K
Leuchtstoffröhre (Kaltweiß)	4.000 K
Xenon-Lampe, Lichtbogen	4.500-5.000 K
Morgensonne-/Abendsonne, D50-Lampe (Druckerei)	5.000 K
Vormittags-/Nachmittagssonne	5.500 K
Elektronenblitzgerät	5.500-5.600 K
Mittagssonne, Bewölkung	5.500-5.800 K
Tageslichtlampe	5.600-7.000 K
Bedeckter Himmel	6.500-7.500 K
Nebel, starker Dunst	7.500-8.500 K
Blauer Himmel (z. B. im Schatten) bzw. kurz nach Sonnenuntergang und kurz vor Sonnenaufgang, <i>Blaue Stunde</i>	9.000-12.000 K
Klares blaues, nördliches Himmelslicht	15.000-27.000 K



(a) Schematic of additive color mixing of three primary colors. (b) Additive color mixing using LEDs.

- RGB (rot, grün, blau) - Farbmischung
- Farbskala (Skalenbereich)
- Skalengröße (Fläche im Farbkoordinatendiagramm) nimmt mit der Anzahl der Lichtquellen zu

Betrachten wir die Farbkoordinaten aus der Mischung von drei diskreten Emissionsbändern (z.B. LEDs) mit spektralen Leistungsdichten $P_1(\lambda)$, $P_2(\lambda)$ und $P_3(\lambda)$ mit peak Wellenlängen von λ_1 , λ_2 und λ_3 . Jedes dieser Emissionsbänder ist schmaler als die drei Farb Anpassungsfunktionen und sie haben die drei Farbkoordinaten (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) . Dann ergibt sich der Tristimulus Wert zu

$$X = \int \bar{x}(\lambda)P_1(\lambda)d\lambda + \int \bar{x}(\lambda)P_2(\lambda)d\lambda + \int \bar{x}(\lambda)P_3(\lambda)d\lambda \approx \bar{x}(\lambda_1)P_1 + \bar{x}(\lambda_2)P_2 + \bar{x}(\lambda_3)P_3$$

$$Y = \int \bar{y}(\lambda)P_1(\lambda)d\lambda + \int \bar{y}(\lambda)P_2(\lambda)d\lambda + \int \bar{y}(\lambda)P_3(\lambda)d\lambda \approx \bar{y}(\lambda_1)P_1 + \bar{y}(\lambda_2)P_2 + \bar{y}(\lambda_3)P_3$$

$$Z = \int \bar{z}(\lambda)P_1(\lambda)d\lambda + \int \bar{z}(\lambda)P_2(\lambda)d\lambda + \int \bar{z}(\lambda)P_3(\lambda)d\lambda \approx \bar{z}(\lambda_1)P_1 + \bar{z}(\lambda_2)P_2 + \bar{z}(\lambda_3)P_3$$

wobei P_1 , P_2 , und P_3 sind die optischen Leistungen der drei Lichtquellen. Mit den Abkürzungen

$$L_1 = \bar{x}(\lambda_1)P_1 + \bar{y}(\lambda_1)P_1 + \bar{z}(\lambda_1)P_1$$

$$L_2 = \bar{x}(\lambda_2)P_2 + \bar{y}(\lambda_2)P_2 + \bar{z}(\lambda_2)P_2$$

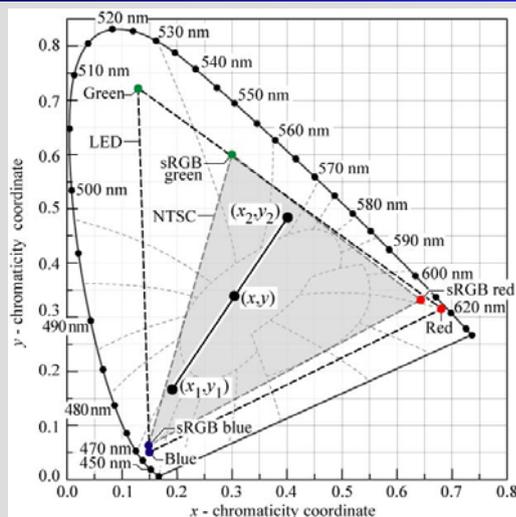
$$L_3 = \bar{x}(\lambda_3)P_3 + \bar{y}(\lambda_3)P_3 + \bar{z}(\lambda_3)P_3$$

Kann die Farbkoordinate (FK) des gemischten Lichtes durch die Tristimuluswerte berechnet werden zu

$$x = \frac{x_1 L_1 + x_2 L_2 + x_3 L_3}{L_1 + L_2 + L_3} \quad y = \frac{y_1 L_1 + y_2 L_2 + y_3 L_3}{L_1 + L_2 + L_3}$$

Die FK des multi-komponenten Lichtes ist eine lineare Kombination der individuellen FK gewichtet mit den L_i -Faktoren

[apl.Prof. Dr. D.J. As](#)



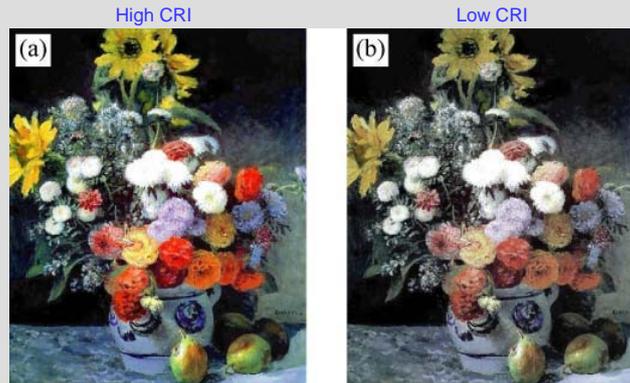
Principle of color mixing illustrated with two light sources with chromaticity coordinates (x_1, y_1) and (x_2, y_2) . The resulting color has the coordinates (x, y) . Also shown is the triangular area of the chromaticity diagram (color gamut) accessible by additive mixing of a red, green, and blue LED. The locations of the red, green, and blue phosphors of the sRGB display standard ($x_r = 0.64$, $y_r = 0.33$, $x_g = 0.30$, $y_g = 0.60$, $x_b = 0.15$, $y_b = 0.06$) are also shown. The sRGB standard is similar to the NTSC standard.

- Farbskala
- Skala für rot-grün-blau Lichtquellen haben dreieckige Form
- Fläche der Skala ist Gegenstand für Bildschirme, Farbdrucker , ...

[apl.Prof. Dr. D.J. As](#)

Eine weiteres wichtiges Charakteristika einer weißen Lichtquelle ist die Fähigkeit die richtigen (naturgetreuen) Farben eines physikalischen Objekts, wie z.B. Früchte, Pflanzen, Spielzeuge, ..., bei Beleuchtung wiederzugeben (Kleiderfarbe beim Einkauf in Kaufhäusern). Diese Fähigkeit wird durch die sogenannten Farbwiedegabestufe (color rendering index) R_a oder CRI gemessen.

Bild „französische Impressionen“ von Auguste Renoir beleuchtet von unterschiedlichen Lichtquellen



apl.Prof. Dr. D.J. As

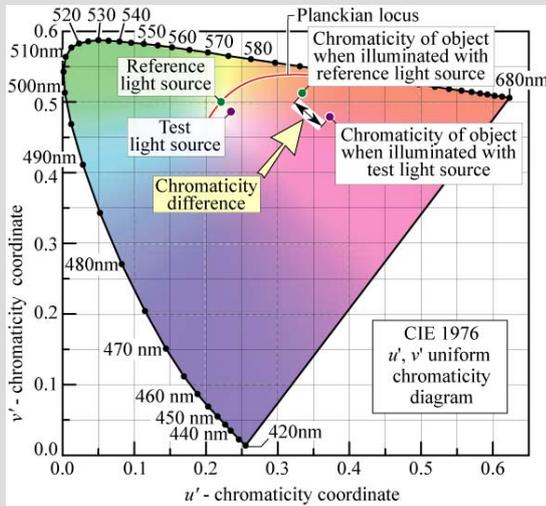
Unter **Farbwiedergabeindex** versteht man eine photometrische Größe, mit welcher sich die Qualität der Farbwiedergabe von **Lichtquellen** gleicher **korrelierter Farbtemperatur** beschreiben lässt. Die abgekürzte Schreibweise für den Farbwiedergabeindex ist " **R_a** ".

Als **Referenz** zur Beurteilung der Wiedergabequalität dient das Licht, das von einem **schwarzen Strahler der entsprechenden Farbtemperatur** abgegeben wird. Der Farbwiedergabeindex ist nicht von einer bestimmten Farbtemperatur abhängig. Jede Lichtquelle, die das Spektrum eines schwarzen Strahlers gleicher (korrelierter) Farbtemperatur im Bereich der sichtbaren Wellenlängen perfekt nachbildet, erreicht einen Farbwiedergabeindex von 100. Spektralanteile außerhalb des sichtbaren Bereiches spielen keine Rolle bei der Ermittlung des Farbwiedergabeindex.

Eine Glühlampe mit farblosem Glaskolben besitzt mit einem R_a von 100 ausgezeichnete Farbwiedergabeeigenschaften, während etwa preiswerte Leuchtstofflampen einen Wert von 70 bis 80 erreichen.

Eine Lichtquelle, deren Licht sich nur aus einer Wellenlänge zusammensetzt, was etwa bei Natriumdampf-Niederdrucklampen der Fall ist, erlauben überhaupt keine Unterscheidbarkeit von Farben und weisen demzufolge einen sehr niedrigen R_a -Wert auf.

apl.Prof. Dr. D.J. As



Chromaticity difference resulting from the illumination of an object with a reference and a test light source. In the CIE 1976 u', v' uniform chromaticity diagram, the color difference is directly proportional to the geometric distance. The reference light source is located on the planckian locus at the correlated color temperature of the test light source.

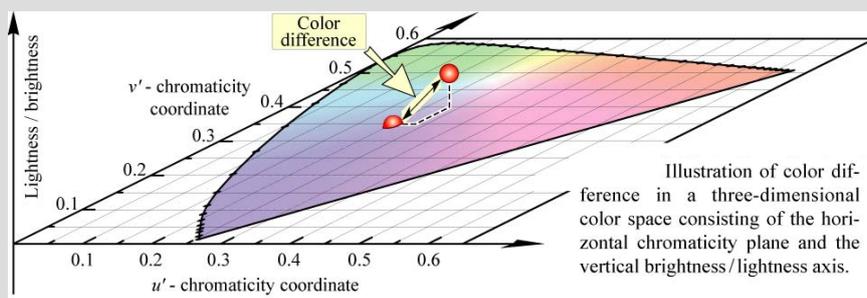


Illustration of color difference in a three-dimensional color space consisting of the horizontal chromaticity plane and the vertical brightness/lightness axis.