

## Die Farbmessung – Das CIE-Farbenraum

# Die Farbmessung – Das CIE-System 1931

## Einleitung

Die Messung einer Farbe ist im Grunde genommen nichts anderes als ein standardisiertes Farbsehen. Die beiden Faktoren Licht und Betrachter sind dabei genormt.

Die wissenschaftliche Grundlage für die Farbmessung basiert auf der Existenz von 3 verschiedenen Signalgruppen (Primärvalenzen Blau, Grün, Rot), die vom Auge des Betrachters weitergeleitet werden. Ausgangspunkt für die Übertragung in ein genormtes System ist die Empfindlichkeit der S-, M- und L-Zapfen. Die Empfindlichkeiten, bezogen auf die Wellenlänge, sind heutzutage bekannt. Die CIE, die Commission Internationale de l'Éclairage (Internationale Beleuchtungskommission), legte 1931 als Basis für ein internationales farbmatisches System drei (leicht zu realisierende) Spektralfarben als Primärvalenzen fest, nämlich Rot R = 700,0 nm, Grün G = 546,1 nm und Blau B = 435,8 nm.

Die Empfindlichkeit der Zapfen ist aber auch abhängig von dem Winkel der Betrachtung. Die Normung erfolgte unter dem Begriff CIE-Normalbeobachter.

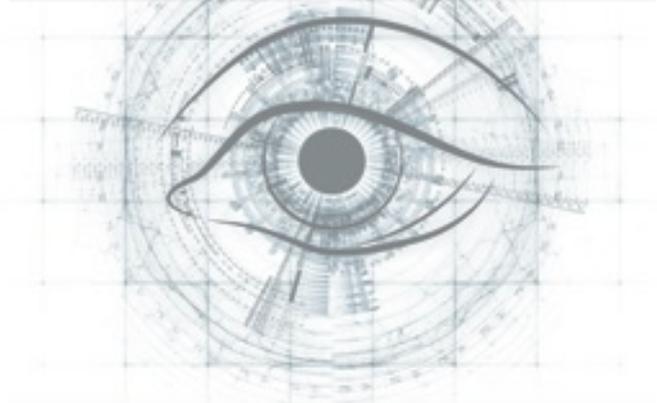
Der Normalbeobachter ist wie die Normlichtart eine Tabelle von Zahlenwerten, die einen „durchschnittlichen normalen menschlichen Betrachter“ repräsentieren. Die Farbwahrnehmungen sind dabei nicht für einen individuellen Betrachter spezifisch.

## Der Hellempfindlichkeitsgrad des menschlichen Auges – Die Helligkeit

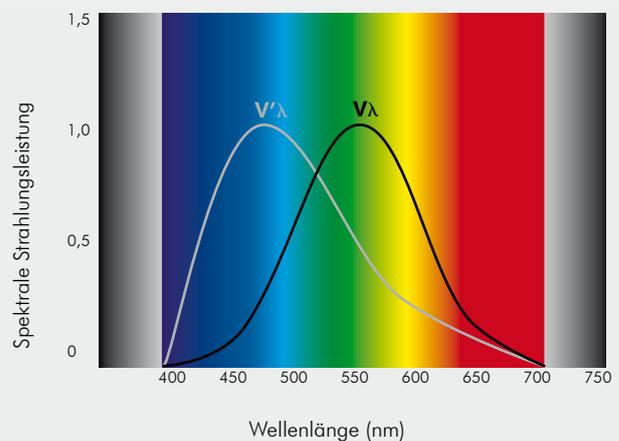
Im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums (400 nm - 700 nm) empfindet das menschliche Auge gleiche spektrale Strahldichten verschiedener Wellenlängen unterschiedlich hell. Diese spektrale Hellempfindlichkeit des Auges wurde von der CIE (Internationale Beleuchtungskommission) für den Normalbeobachter gemessen und standardisiert. Die  $V(\lambda)$ -Kurve gilt für das Helligkeitssehen (photopisches Sehen), bei der die Zapfen auf der Netzhaut aktiv sind. Die Werte für den Hellempfindlichkeitsgrad für das Tagesehen wurden 1923 von der CIE aufgestellt und 1924 zur Durchführung von farbmess-technischen Berechnungen übernommen.

Die  $V'(\lambda)$ -Kurve gilt für das skotopische Sehen, bei dem die Stäbchen als wirksame Empfänger angesprochen werden. Die Hellempfindlichkeitswerte für das Nachtsehen wurden 1951 von der CIE in eine Norm gefasst.

Im Leuchtdichtebereich zwischen dem Tages- und Nachtsehen, dem mesopischen Bereich (Dämmerungsehen), verschiebt sich die spektrale Empfindlichkeitskurve mit kleiner werdender Adaptationsleuchtdichte auch zu kleineren Wellenlängen.



Hell-Empfindlichkeit des Auges



Hellempfindlichkeit des Auges  
 Kurve  $V\lambda$  = photopisches Sehen / Tag = (CIE 1924)  
 Kurve  $V'\lambda$  = skotopisches Sehen / Nacht = (CIE 1951)

## Die Farbreiz-Empfindung des menschlichen Betrachters

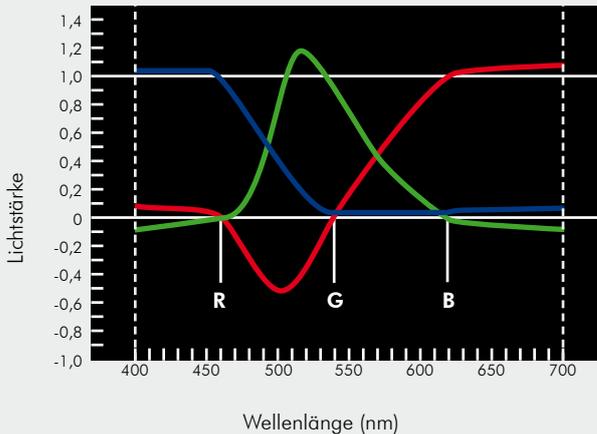
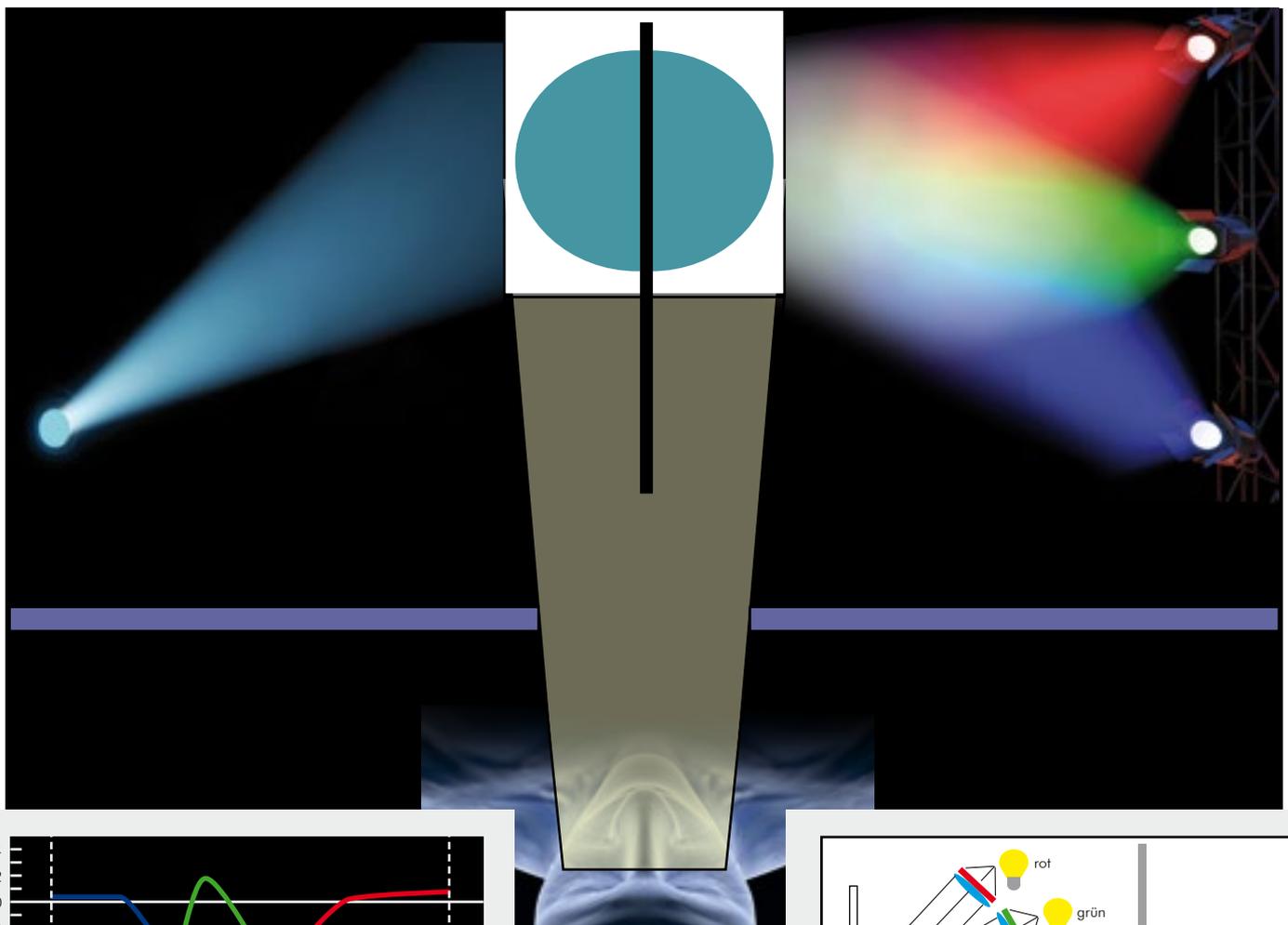
Zur Definition eines „Normalbeobachters“ als Grundlage für alle farbmess-technischen Messungen und Berechnungen wurden Experimente mit normal sehenden menschlichen Betrachtern durchgeführt.

Bei diesen Experimenten wurde ein geteilter Schirm verwendet. Auf die eine Seite wurde eine bestimmte Farbe projiziert, auf die andere Seite drei Strahler in den Lichtfarben blau, grün und rot. Der Betrachter sollte durch Ändern der Helligkeit der drei Lichtquellen den Farbeindruck der ersten Farbe nachstellen (Drei-Farben-Theorie). Die Strahlungsmengen für jede Veränderung der drei Primärlichtquellen und jede Veränderung des Versuchslichts

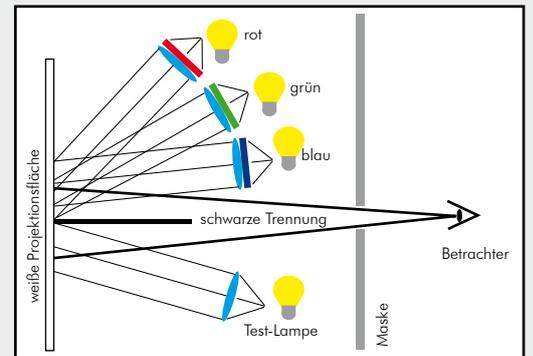
bei jeder Wellenlänge notierte man in einer Tabelle. Der gesamte Bereich der vom Menschen wahrnehmbaren Farbreize konnte so erfasst werden, das Farbsehvermögen war numerisch erfasst.

Die bedeutendsten Experimente für die Bestimmung der trichromatischen Farbreizempfindung des Auges wurden 1928 von W. D. Wright und 1931 von J. Guild vorgenommen. Die Versuche von Wright und Guild konnten nachweisen, dass die Zahlenwerte sich leicht unterschieden, weil die Primärlichtquellen leicht verschieden waren.

Diese Experimente der additiven Farbmischung bestätigten die Drei-Komponenten-Theorie von Young.

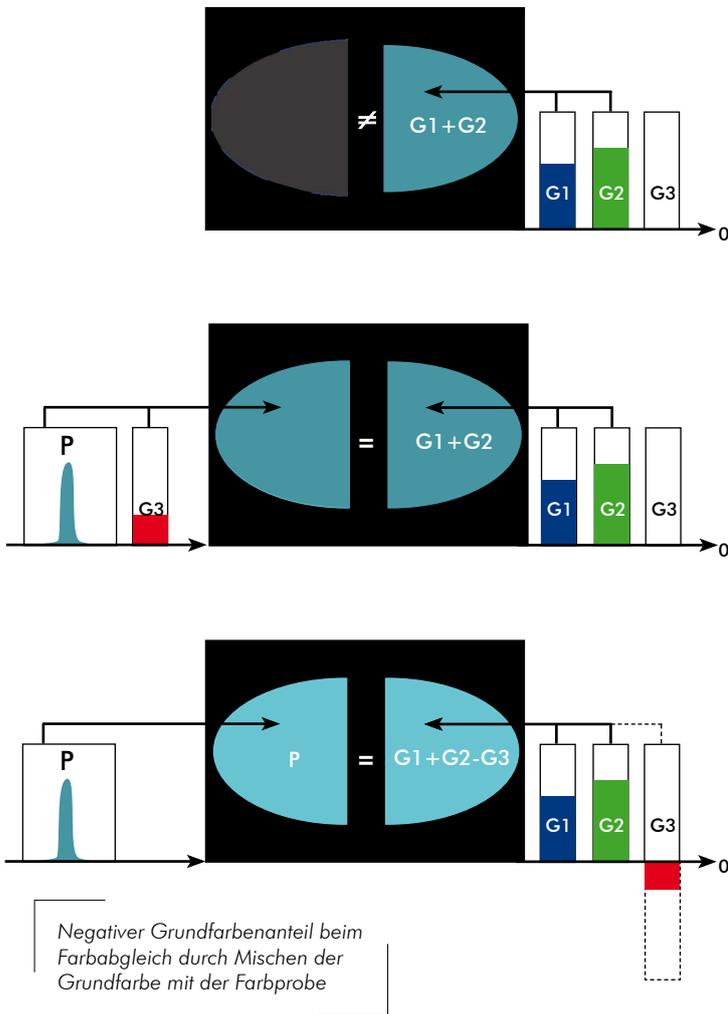


Versuch der additiven Mischung von Lichtstrahlung



## Der farbmestechnische 2°- oder Kleinfeld-Normalbeobachter – CIE31

Bei den Experimenten zur additiven Farbmischung hat sich gezeigt, dass mit den drei RGB-Primärvalenzen der CIE nicht alle reellen Farben erzeugt werden können. Manchmal war es erforderlich, die Farbprobe mit einer der drei Grundfarben zu mischen, um eine Übereinstimmung mit der Mischung aus den restlichen zwei Grundfarben zu erzielen. Das bedeutet, dass bestimmte Farben sich nur dann aus drei Grundfarben ermischen lassen, wenn eine Grundfarbe einen „negativen Anteil“ beisteuert. Für einige Spektralfarben müssten die Werte einer Farbmaßzahl also negativ sein.



**$P + G3 = G1 + G2$**   
entspricht  
 **$P = G1 + G2 - G3$**

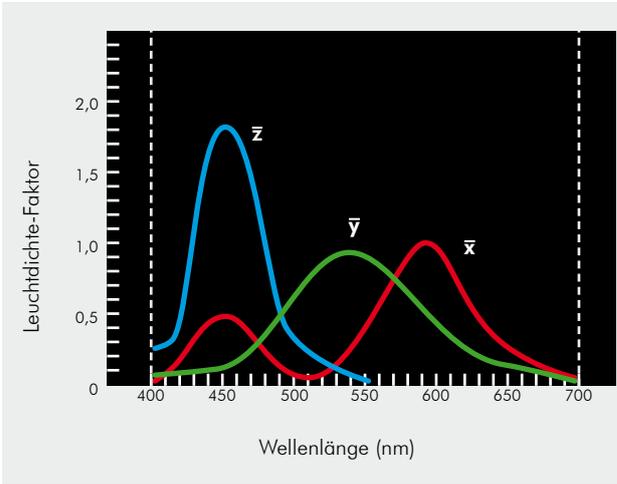
*P ... Farbprobe, G1, G2, G3 ... drei Grundfarben*

Wegen dieser Einschränkungen wurden 1931 von der CIE drei willkürliche, imaginäre Maßzahlen X, Y und Z als Primärvalenzen definiert – ausgewählt nach dem Gesichtspunkt der bequemen farbmestrischen Auswertung. Mit diesen drei Maßzahlen sind alle reellen Farben durch additive Mischung darstellbar. Diese Maßzahlen heißen ‚CIE-Normfarbwerte‘, der Farbraum wird ‚CIE-XYZ-Farbraum‘ genannt.

Die Transformation der RGB-Primärvalenzen in die XYZ-Primärvalenzen erfolgte mit den folgenden Merkmalen:

- Negative Werte in den Gleichungen sollten eliminiert werden (negative Werte waren zu der Zeit äußerst schwer elektronisch zu verarbeiten)
- Definition eines neuen Systems mit drei ‚imaginären‘ Primärvalenzen  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ , damit der Spektralfarbenzug in ein Dreieck fällt, das durch diese drei Primärvalenzen definiert wird
- Die Funktion  $\bar{y}$  wurde so gewählt und berechnet, dass sie der Helligkeitsempfindlichkeitsfunktion  $V(\lambda)$  (CIE 1924) entspricht und somit die Berechnungen vereinfacht werden können
- Die Funktion  $\bar{z}$  wurde für den größten Teil des sichtbaren Spektralbereichs mit Null gleichgesetzt, um auch hier die Berechnungen zu vereinfachen
- Die Berechnungen wurden für eine Lichtquelle mit gleicher Strahlung sowie für den gesamten Spektralbereich durchgeführt, damit die Flächen der  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ -Funktionen gleich sind.

Die so entstandenen Funktionen werden CIE- $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ -Spektralwertfunktionen genannt. Sie sind keine wirklichen Funktionen im eigentlichen Sinn; sie repräsentieren den durchschnittlichen Normalbeobachter und wurden 1931 von der CIE als Norm festgelegt.



Spektralwertfunktionen  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  des Normalbeobachters 2° (CIE31)

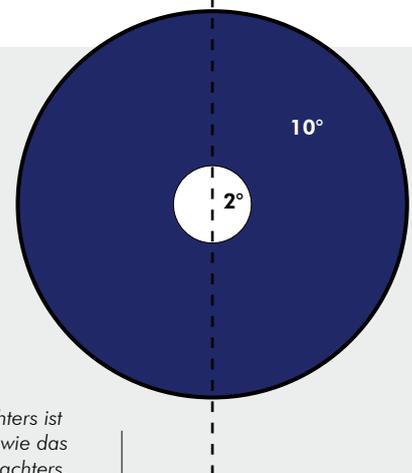
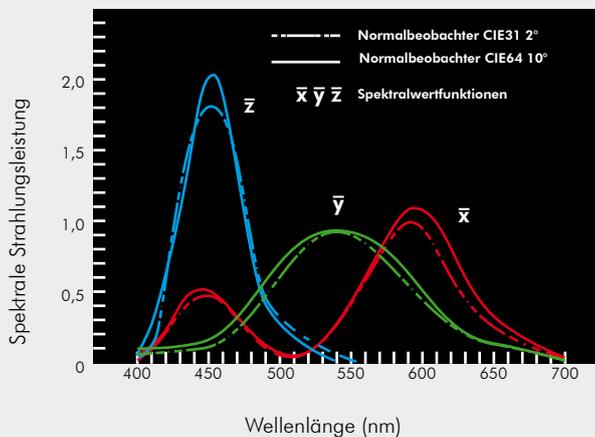
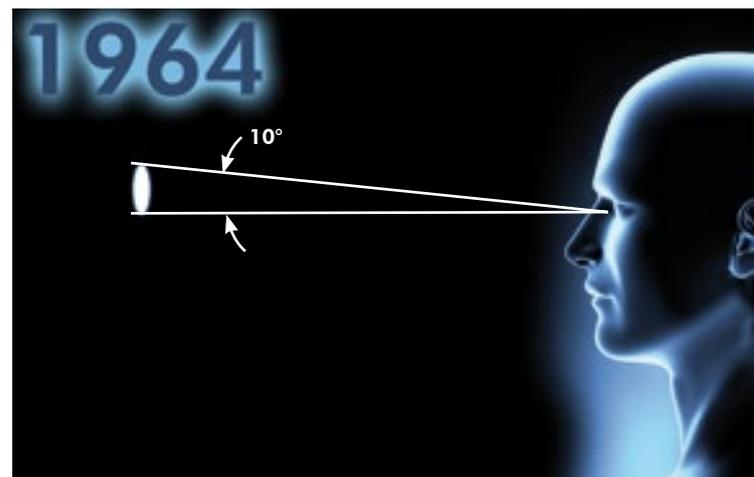
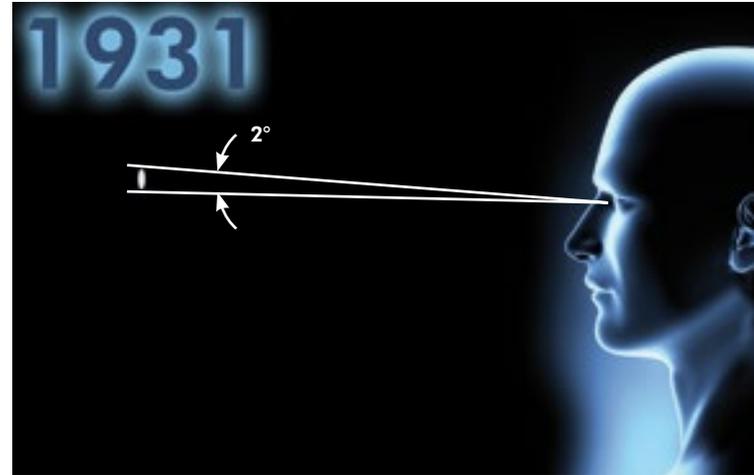
## Der farbmesstechnische 10° - oder Grossfeld-Normalbeobachter CIE64

Damit die Art der menschlichen Wahrnehmung kontrolliert in ein Messergebnis einfließen kann, war es notwendig, einen Standard für das menschliche Sehen zu definieren. Man hat dieses normierte Sehen in den sogenannten CIE Normalbeobachtern definiert.

Der Normalbeobachter CIE31 oder 2°-Normalbeobachter geht auf ein Experiment zur Bestimmung der durchschnittlichen Farbempfindung des menschlichen Betrachters zurück. Dabei wurde berücksichtigt, dass der Mensch Farben am exaktesten wahrnimmt, wenn sie im Auge auf den Bereich des schärfsten Sehens (Fovea, gelber Fleck) treffen. Bei normalem Betrachtungsabstand von einer Farbprobe weicht dieser Bereich ca. 2° von der optischen Achse des Auges ab. Daher wurde festgelegt, dass der Winkel, unter dem der Normalbeobachter sieht, genau diese 2° betragen soll. Dies entspricht einem Sichtfeld in der Größe einer 1-Euro-Münze, die man mit ausgestrecktem Arm vor sich hält.

Das normale Sichtfeld der menschlichen Wahrnehmung ist allerdings größer als dieser 2°-Bereich. Außerdem konnten Jacobsen (1948) und Judd (1949) nachweisen, dass die farbmesstechnischen Berechnungen auf Basis des 2°-Winkels den tatsächlichen Beobachtungen im Bereich der kurzen Wellenlängen (insbesondere bei violett) nicht gut entsprachen. So schlug die CIE im Jahre 1960 einen weiteren Norm-Betrachtungswinkel, den 10° Normalbeobachter, vor. Das entspricht einem Sichtfeld von der Größe eines DIN A4-Blattes in normalem Betrachtungsabstand von 30 cm. Die Spektralwertfunktionen  $\bar{x}_{10^\circ}$ ,  $\bar{y}_{10^\circ}$ ,  $\bar{z}_{10^\circ}$  dieses neuen Normalbeobachters wurden dann im Jahre 1964 endgültig von der CIE als Norm festgelegt.

Das Sichtfeld des 2°-Normalbeobachters entspricht einer 1-Euro-Münze, die man mit ausgestrecktem Arm vor sich hält.



Das Sichtfeld des 10°-Normalbeobachters ist ca. 27 Mal so groß wie das des 2°-Normalbeobachters.

Spektralwertfunktionen  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  des Normalbeobachters 10° (CIE64)

## Farbmesstechnische Berechnungen der Normfarbwerte XYZ des CIE-Systems 1931

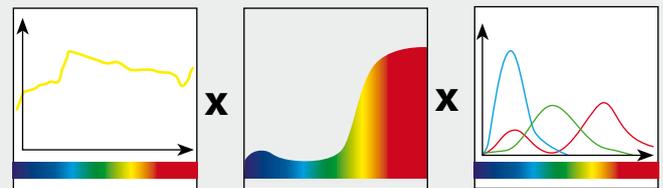
Unter Verwendung der Normspektralwertfunktionen  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  des Normalbeobachters kann die Spektralkurve in 3 Werte, die sogenannten Normfarbwerte XYZ, umgewandelt werden. Mit Hilfe dieser Normfarbwerte kann die Farbe eines Objektes oder einer Lichtquelle anhand von drei Maßzahlen bestimmt werden.

### Ein Beispiel: Berechnung des Normfarbwertes X einer Farbvalenz

Dazu multipliziert man für jede Wellenlänge des sichtbaren Spektralbereichs den Wert der Spektralwertfunktion  $x$  mit dem Wert der spektralen Strahlungsleistung  $S$  einer Normlichtart bei derselben Wellenlänge. Diese Berechnung führt man für jede im gesamten Spektralbereich (400 nm – 700 nm) gewählten Wellenlängenschrittweite ( $d\lambda$ ) durch. Anschließend errechnet man die Summe der so errechneten Produkte für alle Wellenlängen ( $\sum$  von 400 – 700 nm).

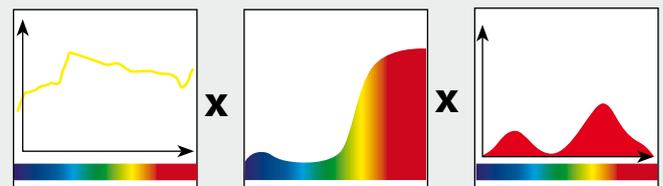


= Farbwahrnehmung

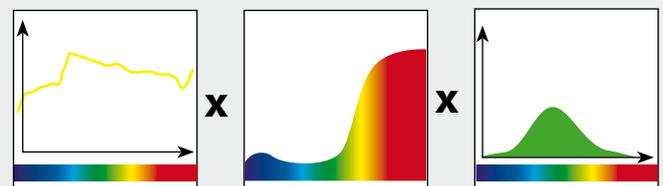


= Farbmetrische Beschreibung

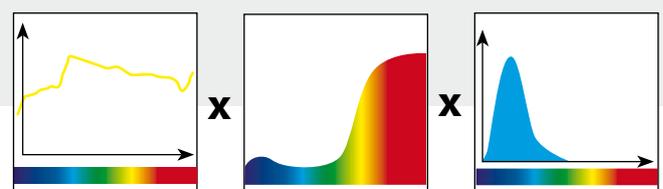
$$X = \sum_{400}^{700}$$



$$Y = \sum_{400}^{700}$$



$$Z = \sum_{400}^{700}$$



Zur eindeutigen Klassifizierung von Farbe benötigen wir:

1. Die Strahlungsverteilung der Lichtart (E)
2. Die wellenlängenabhängige physikalische Remission / den Reflexionsgrad des Objektes (R)
3. Die Valenzen des Beobachters / die Spektralwertfunktion des Normalbeobachters  $\bar{x}$

Für die Berechnung einer Farbvalenz von einem bunten Objekt setzt man die Strahlung  $S(\lambda)$  dem Produkt  $E(\lambda) \cdot R(\lambda)$  bei jeder Wellenlänge gleich, d. h. die Strahlung der Lichtquelle  $E(\lambda)$ , die ein Objekt beleuchtet, wird um den Prozentsatz des Reflexionsgrades dieses Objektes reduziert, und zwar für jede Wellenlängenschrittweite ( $\Delta\lambda$ ).

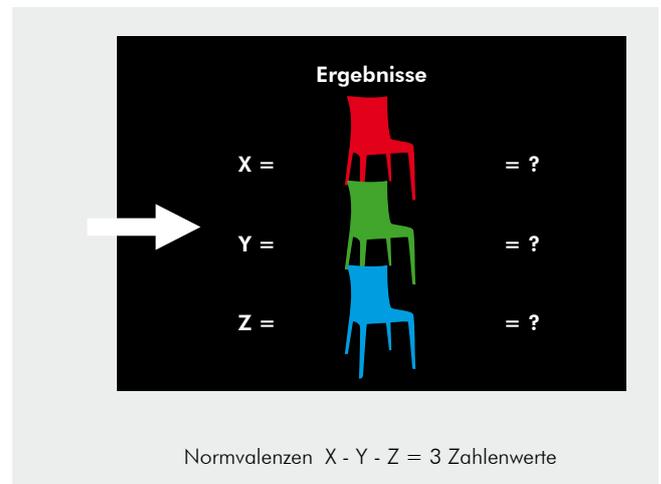
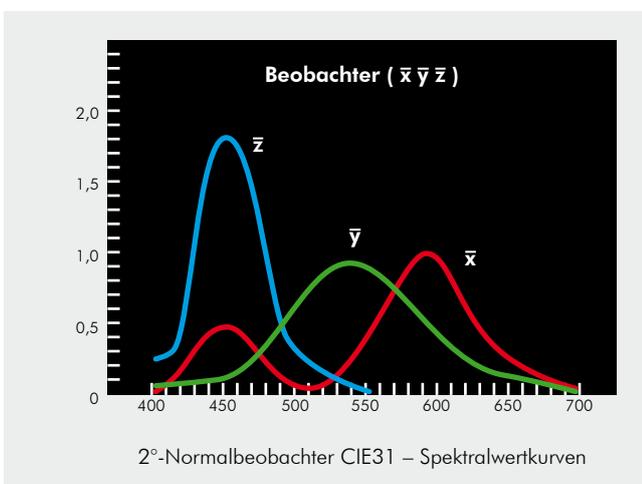
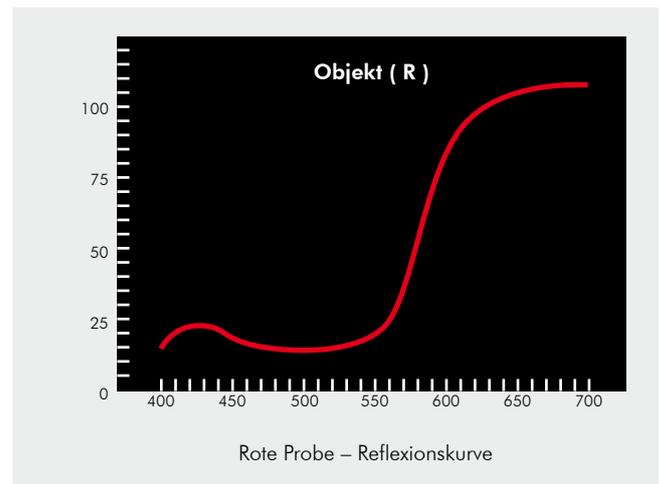
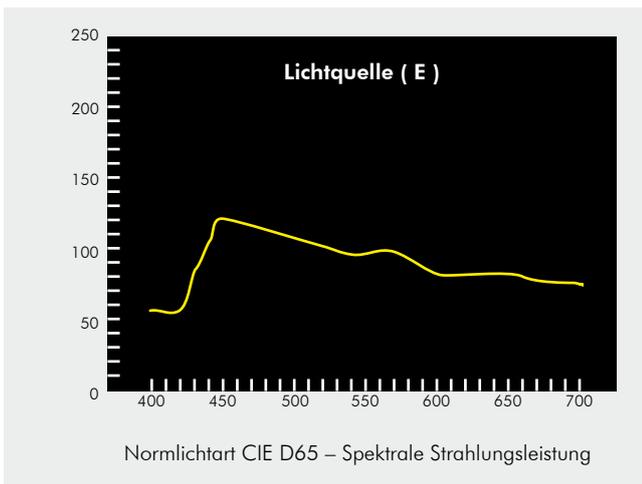
Die mathematische Formel für den Normfarbwert X des bunten Objektes ist also:

$$X = \sum_{400}^{700} E(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot \Delta\lambda$$

Wobei

- E = die Strahlung der Lichtquelle (Lichtart)
- R = der Reflexionsgrad des Objektes
- $\bar{x}$  = die Spektralwertfunktion des Normalbeobachters ist.
- $\lambda$  = Symbol für die Wellenlänge; steht ( $\lambda$ ) hinter anderen Symbolen, bedeutet dies, dass sie wellenlängenabhängig sind.

Bei den Berechnungen von Y und Z verfährt man entsprechend nach derselben Weise.



**Spektrale Strahlungsleistung (E) x Reflexionsfaktoren (R) x Spektralwertfunktionen ( $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ ) = 3 Farbwerte (X, Y, Z)**

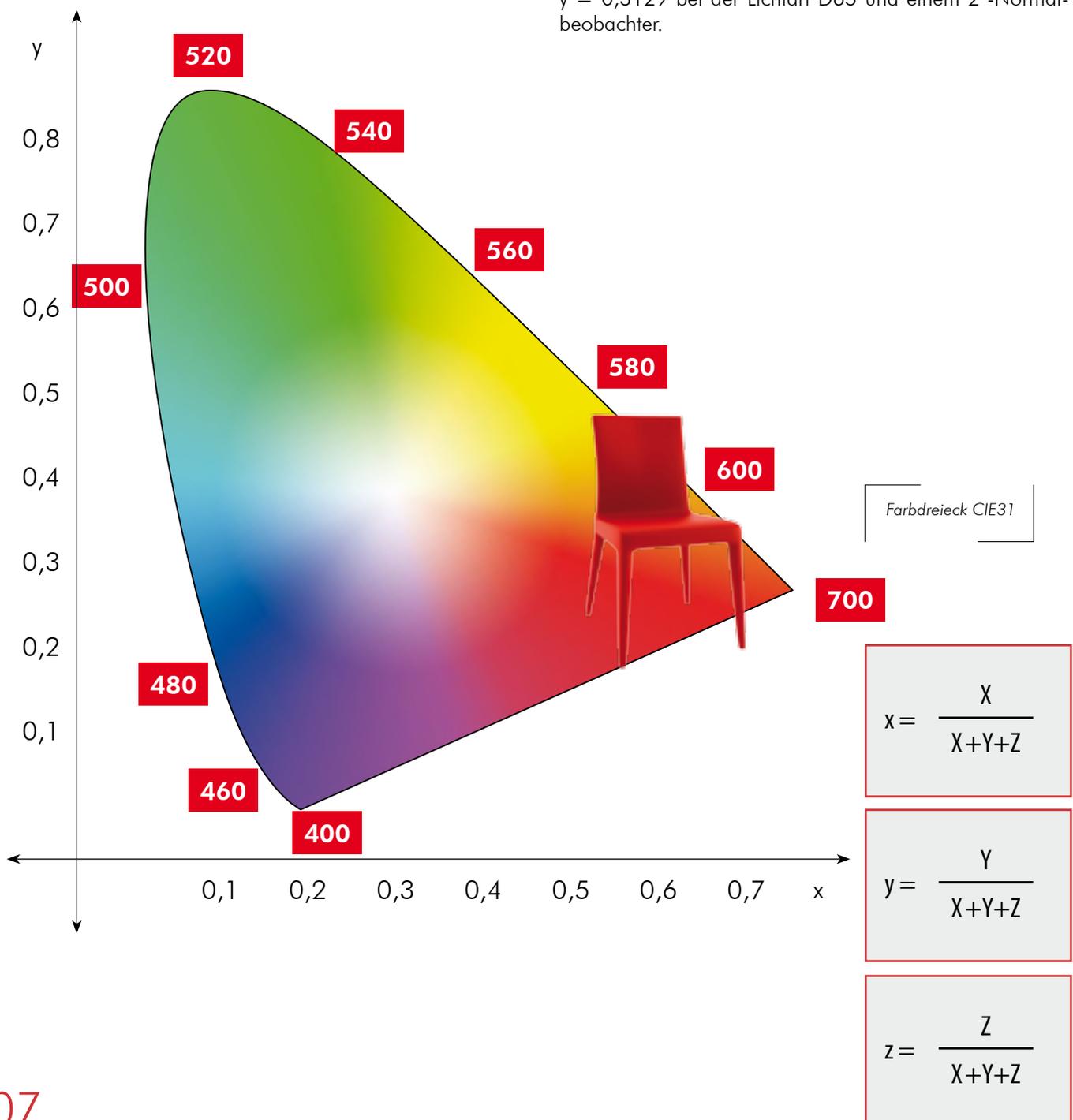
Das Berechnungsprinzip  
für die Normfarbwerte XYZ

**datacolor**

## Die Farbtabelle nach dem CIE Normvalenzsystem CIE31

Mit Hilfe der Normfarbwerte XYZ des Normvalenzsystems CIE31 kann eine Farbe äußerst präzise bestimmt werden. Die Korrelation mit der visuellen Einschätzung ist jedoch leider oft sehr schwierig. Auch wenn der Normfarbwert Y relativ gut dem Helligkeitsempfinden entspricht, lassen sich die X- und Z-Werte nur sehr schwer an die Kriterien der Bunttöne und der Sättigung der visuellen Farbwahrnehmung annähern.

Um den vom Betrachter wahrgenommenen dreidimensionalen Farbraum übersichtlicher (nach Farbart) darstellen zu können, wurde die zweidimensionale CIE-Normfarbtabelle entwickelt. Mit ihrer Hilfe können die Farbvalenzen getrennt von der Helligkeit bestimmt werden. Hierfür hat die CIE die sogenannten Normfarbwertanteile x, y, z eingeführt, wobei x und y für die Bestimmung der Farbart herangezogen werden. „Klein x“ ist der relative Rot-Anteil und „Klein y“ entsprechend der relative Grün-Anteil (z erübrigt sich, da  $z = 1 - x - y$ ). Für den Stuhl aus unserem Beispiel sehen die Farbwertanteile wie folgt aus:  $x = 0,4967$  und  $y = 0,3129$  bei der Lichtart D65 und einem 2°-Normalbeobachter.



Zur graphischen Darstellung schlug die CIE ein Koordinatensystem vor, mit  $x$  als Abszisse und  $y$  als Ordinate. Die Farbwertanteile der reinen Farben des sichtbaren Spektralbereichs bilden eine konkave Kurve in Form einer „Schuhsohle“. Sie wird Spektralfarbenzug genannt. Im Innenbereich der „Schuhsohle“, auch Farbdreieck genannt, sind alle (bei Licht) möglichen Farben dargestellt. Jeder Farbpunkt auf dieser Fläche hat eine andere Farbart. Die Grün- und Blautöne befinden sich im oberen Bereich des Farbdreiecks, die Violett-Töne liegen unten links, die Rottöne unten rechts. Die Verbindungsgerade zwischen Violett und Rot heißt Purpurgerade (Purpur ist keine Spektralfarbe!). Die so umschlossene Fläche enthält die Farborte aller reellen Farbarten.

Im Zentrum der Fläche liegt der neutrale Unbuntpunkt ( $x=0,333$ ,  $y=0,333$ ) einer Lichtquelle energiegleicher Strahlung, auch Weißpunkt genannt. Der Weißpunkt verändert sich entsprechend der verwendeten Lichtart, da jede Lichtart eine andere spektrale Zusammensetzung hat. Die Lichtart A (Glühlampenlicht) ist in der Zone viel gelber / oranger als die anderen Lichtarten. Die Lichtart D65 (Tageslicht) ist weißer und liegt in der Nähe des zentralen Bereichs.

Für die einfachere Bestimmung und Einordnung einer Farbe in der Normfarbtafel CIE31 kann man statt der Normfarbwertanteile auch die bunttongleiche Wellenlänge und die Sättigung einer Farbe definieren. Diese Methode erlaubt die Festlegung einer Farbe nach Buntton und Sättigung, wie bei der visuellen Einordnung. Darin liegt auch der Vorteil dieser Methode. Die bunttongleiche Wellenlänge ist die Wellenlänge, die der additiven Farbmischung der gesuchten Farbe entspricht. Sie beschreibt den Buntton des reinen Farbpunktes. Die Sättigung ist der prozentuale Anteil der reinen Farbe in der Mischung. Die höchste Sättigung ist gleich 1. Sie entspricht der reinen Farbe. Eine Sättigung von 0 entspricht der Farbe der Lichtart (weißes Licht). Die Sättigung ist auf dem Spektralfarbenzug am höchsten, im zentralen Unbuntpunkt am niedrigsten.

## Schlussfolgerung – Anmerkungen

Zusammenfassend kann man bis hierher sagen, dass die Farbe eines Objektes, z. B. der roten Probe, mit Hilfe des Normvalenzsystems CIE31 anhand von drei Maßzahlen  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  und unter Berücksichtigung der Normlichtart und des Normalbeobachters CIE31 eindeutig bestimmt werden kann.

### Das Normvalenzsystem CIE31 ist die wissenschaftliche Grundlage der modernen Farbmessung.

Auf diesem System basieren alle Arbeiten und Forschungen zur Entwicklung neuer farbmess technischer Formeln seit 1936 bis heute. Und obwohl es die äußerst präzise Bestimmung einer Farbe anhand von drei Maßzahlen ermöglichte, war es immer wieder Gegenstand zahlreicher Studien und Verbesserungen. Einige davon werden Sie in den folgenden Kapiteln kennenlernen.



# Die Farbenräume

## Allgemeines

Die Gesamtheit aller Farbreize, die vom Sehsinn wahrgenommen werden, bildet einen strukturierten Raum. Gemäß Definition ist ein Raum eine unendliche Weite, die alle Objekte enthält und umgibt.

Farbräume helfen, Farben durch Zahlen zu definieren, und liefern so ein objektives Kriterium zur Klassifizierung der Farben. Darüber hinaus dienen sie der Darstellung und Bestimmung von Farbunterschieden. Diese Eigenschaft wird für die Definition der Akzeptanz angewandt.

Heute gibt es eine Vielzahl von Farbatlanten und Farbauswahlkatalogen in den unterschiedlichsten Formen. Der Aufbau eines jeden einzelnen von ihnen folgte einem eigenen kreativen Ansatz und kann in kein mathematisches Modell gefasst werden.

Die Entstehung der Farbmessung im Jahre 1931 machte es möglich, die Struktur der Gesamtheit aller wahrnehmbaren Farben präzise zu beschreiben und die Grenzen für ihre Nutzung zu definieren.

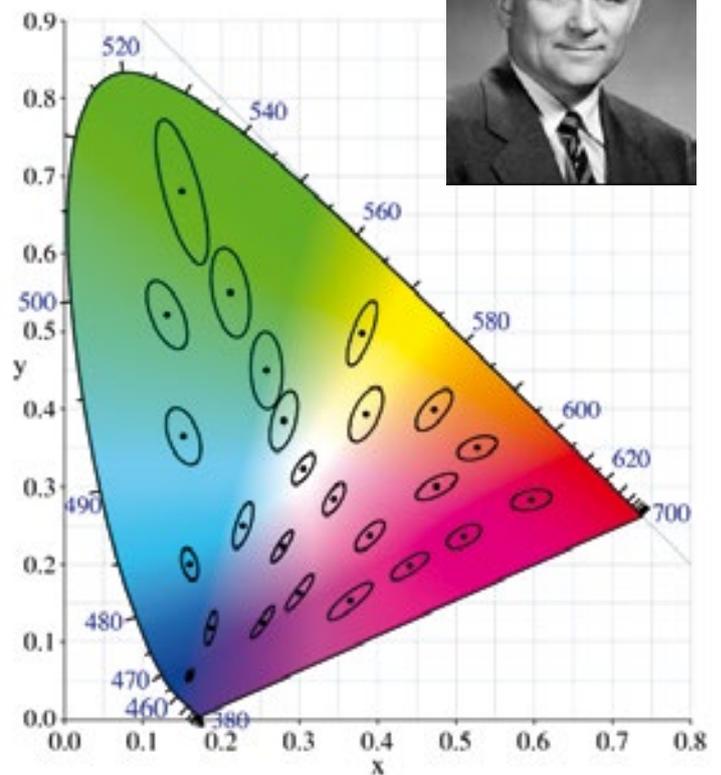
## Geschichte – Entwicklung von 1905 bis 1976

Anfang des 20. Jahrhunderts entwickelte Albert Henry Munsell ein Farbsystem auf wissenschaftlicher Grundlage. Er bestimmte Farben nach den messbaren Eigenschaften Farbton, Helligkeit und Sättigung und ordnete sie entsprechend dreidimensional an. 1905 veröffentlichte er die Publikation "A Color Notation", in der das System beschrieben ist. 1915 erschien der erste Farbatlas, der den dreidimensionalen Farbraum aus verschiedenen Perspektiven zeigt. Der MUNSELL-Farbatlas orientierte sich am Farbempfinden des menschlichen Betrachters und zeigte

- einen optisch ausgeglichenen Aufbau (gleichförmiger Farbenraum) und
- eine Methode für die reziproke Bestimmung der Farben, wo jede Farbe nur einen einzigen Platz einnehmen kann.

Das Normvalenzsystem CIE31 dagegen geht von den physikalischen Eigenschaften des Lichtes aus. Mit dem CIE-System soll eine Vereinheitlichung und Normung der Lichtquellen sowie der Körperfarben erzielt werden. Die empfindungsgemäße Gleichabständigkeit der Farben wird hier nicht berücksichtigt. Diese Ungleichmäßigkeit des CIE31 Farbenraums konnte MacAdam (1942) mit seinen Experimenten zur visuellen Wahrnehmung von Farben nachweisen. Ein Betrachter sollte bei konstanten Beleuchtungsbedingungen 2 Farben betrachten – eine Farbe war fix, die zweite sollte er so einstellen, dass sie mit der Testfarbe identisch war. Die Versuche wurden mit 25 verschiedenen Testfarben aus dem CIE31 Diagramm durchgeführt. Die justierten Farben lagen alle in einer Ellipse um die ursprüngliche Testfarbe herum, wobei Form und Ausrichtung der Ellipsen, je nach Farbe, sehr unterschiedlich waren.

David L. MacAdam



CIE-Farbdigramm mit MacAdam-Ellipsen

## Der CIE Lab-Farbenraum – Definitionen und Eigenschaften

Dies veranlasste die CIE, mathematische Transformationen für den Farbenraum CIE31 zu entwickeln, um einen gleichförmigen Farbenraum zu erhalten.

1976 empfahl die CIE dann zwei neue Systeme, die CIELuv- und CIE Lab-Farbenräume. Zur Unterscheidung von anderen Systemen (insbesondere vom Hunter-System) wurden alle verwendeten Parameter mit einem \* versehen (z. B.  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ).

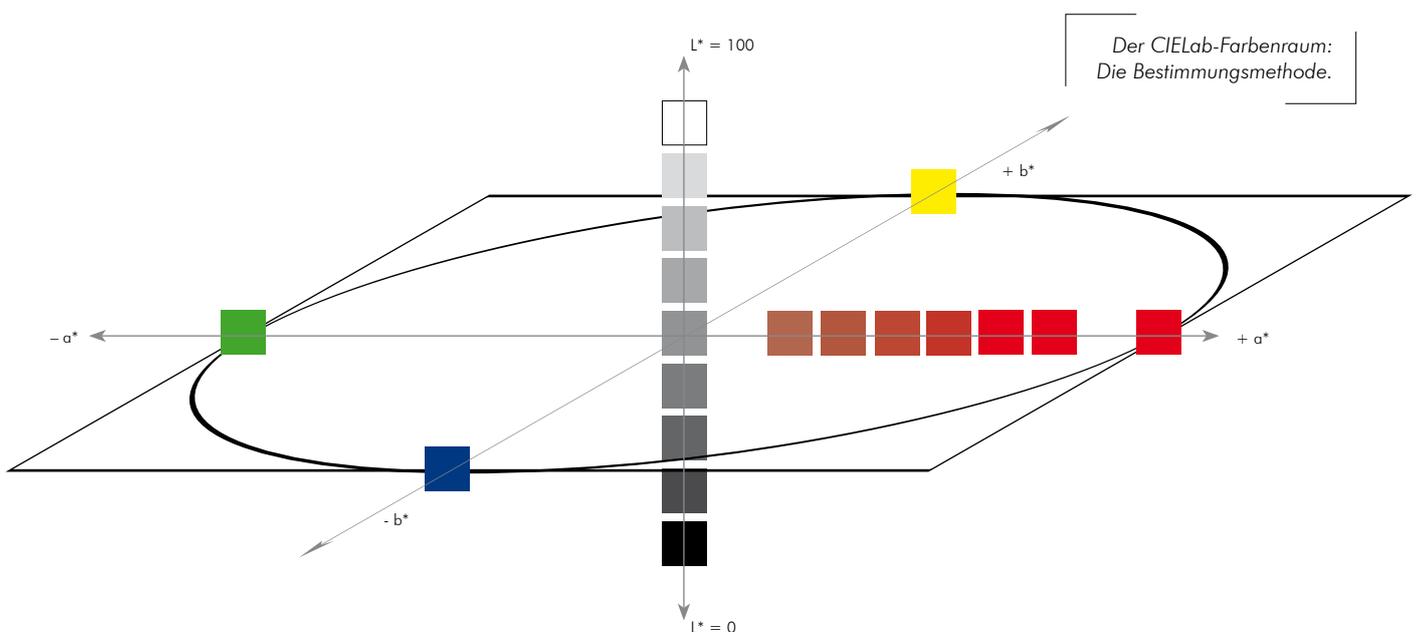
Das CIELuv-System wird eher für additive Farbmischungen verwendet, wie z. B. die Lichtfarbenbewertung von Scannern und Monitoren. Das CIE Lab-System beschränkt sich auf die Untersuchung von Körperfarben.

Das CIE Lab-System ist in den Anwendungen der Farbmessung bis heute das gebräuchlichste. Aus diesem Grund werden wir dieses System im Folgenden etwas genauer betrachten.

Der Farbenraum CIE76, auch CIE Lab-Farbenraum oder CIE Lab-System genannt, beruht auf einer nichtlinearen Transformation des X,Y,Z-Farbenraumes (CIE31). Bei der Entwicklung des CIE Lab-Systems verfolgte die CIE gleich zwei Ziele:

- die Definition eines Farbraumes, in dem gleiche geometrische Abstände gleichen empfindungsgemäßen Abständen entsprechen und
- die Entwicklung eines viel einfacheren Interpretationssystems, in dem man sich leichter orientieren kann.

Der CIE Lab-Farbenraum ist bedingt gleichabständig und geräteunabhängig. Jede wahrnehmbare Farbe im Farbraum ist durch den Farbort mit den Koordinaten  $\{L^*, a^*, b^*\}$  definiert. In Anwendung der Gegenfarbentheorie liegen sich hier Grün und Rot auf der  $a^*$ -Achse gegenüber. Die  $b^*$ -Achse entspricht den Gegenfarben Blau und Gelb. Die  $L^*$ -Achse steht auf dieser Ebene senkrecht und gibt die Helligkeit wieder. Die  $L^*$ -Achse kann auch als Neutralgrauachse bezeichnet werden, da sie die Endpunkte Schwarz ( $L=0$ ) und Weiß ( $L=100$ ) besitzt und die Zwischenwerte auf dieser Achse die unbunten Grautöne sind.



Die Formel für die Transformation und Berechnung des Farbenraums CIE76 (CIELab) auf der Grundlage von XYZ (CIE31) sieht wie folgt aus:

**Farbwerte: L\* a\* b\***

$$L^* = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \quad \text{für } \frac{Y}{Y_n} > 0,008856 \quad a^* = 500 \left[ f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right]$$

$$L^* = 903,3 \left(\frac{Y}{Y_n}\right) \quad \text{für } \frac{Y}{Y_n} \leq 0,008856 \quad b^* = 200 \left[ f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right]$$

wobei

■ wenn  $\frac{X}{X_n} > 0,008856$ ,  $f\left(\frac{X}{X_n}\right) = \sqrt[3]{\frac{X}{X_n}}$ , sonst  $f\left(\frac{X}{X_n}\right) = 7,787 \left(\frac{X}{X_n}\right)$

■ wenn  $\frac{Y}{Y_n} > 0,008856$ ,  $f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}}$ , sonst  $f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) = 7,787 \left(\frac{Y}{Y_n}\right)$

■ wenn  $\frac{Z}{Z_n} > 0,008856$ ,  $f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}}$ , sonst  $f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) = 7,787 \left(\frac{Z}{Z_n}\right)$

Die Werte  $X_n, Y_n, Z_n$  sind die Farbwerte eines absoluten Weiß (idealweiser unbunter Farbreiz) einer Körperfarbe bei der jeweiligen CIE-Normlichtart (z. B. D65 oder A). Unter diesen Bedingungen sind  $X_n, Y_n, Z_n$  Farbwerte der Normlichtart, wo  $Y_n$  gleich 100 ist.

**Zum Beispiel: für D65/10°:**

$X_n = 94,81$   
 $Y_n = 100,00$   
 $Z_n = 107,304$

Zur Beschreibung der Farbabstände mit Hilfe der Korrelationsfaktoren Helligkeit, Buntheit (Sättigung) und Buntton kann man die im Folgenden definierten Sätze verwenden:

■ **Helligkeit CIE76: L\***

Die Größe L\* wird durch die folgende Relation definiert:

$$L^* = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 \quad \text{für } \frac{Y}{Y_n} > 0,008856$$

$$L^* = 903,3 \left(\frac{Y}{Y_n}\right) \quad \text{für } \frac{Y}{Y_n} \leq 0,008856$$

■ **Sättigung – Buntheit CIE76: C\***

Die Größe C\* wird durch die folgende Relation definiert:

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

■ **Bunttonwinkel CIE76: h**

Die Größe h wird durch die folgende Relation definiert:

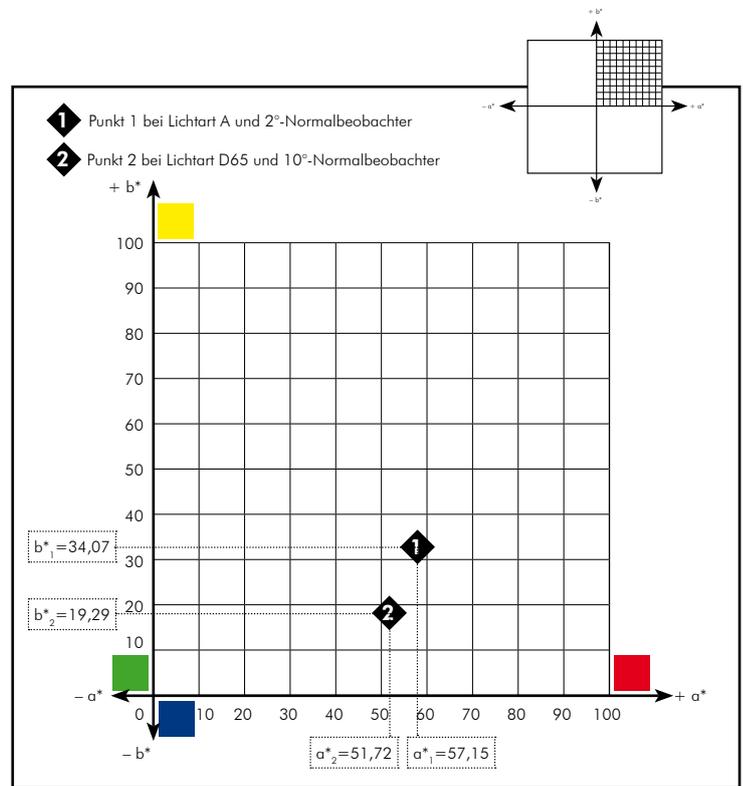
$$h = \arctg \left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

Darüber hinaus hat der CIE Lab-Farbenraum die Eigenschaften eines euklidischen Raumes. Jeder seiner Punkte kann beschrieben werden durch:

■ seine rechtwinklig aufgetragenen Koordinaten  $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$ , wobei

- $L^*$  die Helligkeit
- $a^*$  die Farbvalenz rot-grün
- $b^*$  die Farbvalenz gelb-blau repräsentieren

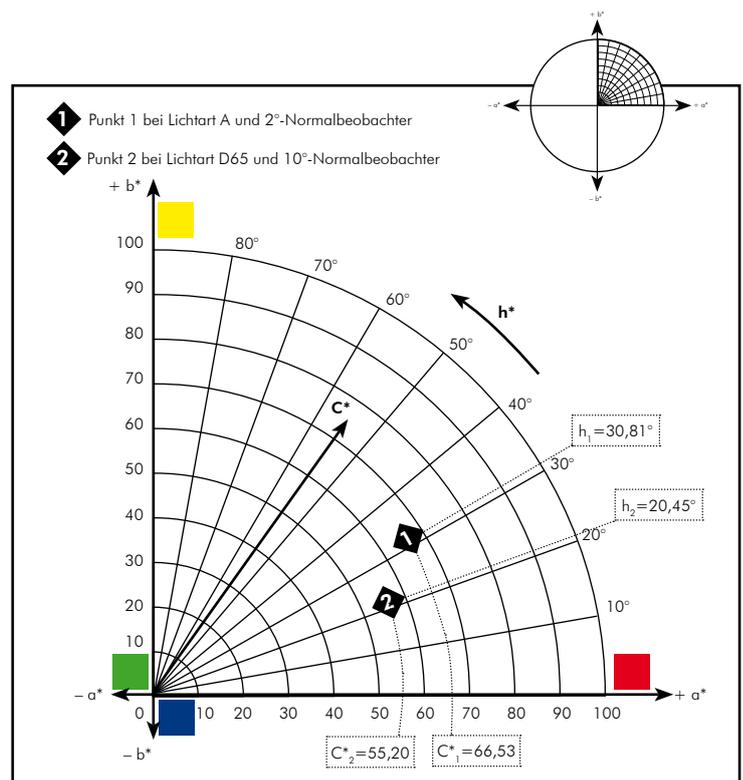
Lage der Farbpunkte in rechtwinklig dargestellten Koordinaten  $L^*$   $a^*$   $b^*$  des CIE Lab-Systems



■ oder durch seine zylindrisch aufgetragenen Koordinaten  $L^*$ ,  $C^*$  und  $h^*$ , wobei

- $L^*$  immer noch die Helligkeit
- $C^*$  die Buntheit oder die Sättigung
- $h^*$  den Bunttonwinkel oder den Farbton repräsentieren.

Lage der Farbpunkte in zylindrisch dargestellten Koordinaten  $L^*$   $C^*$   $h^*$  des CIE Lab-Systems

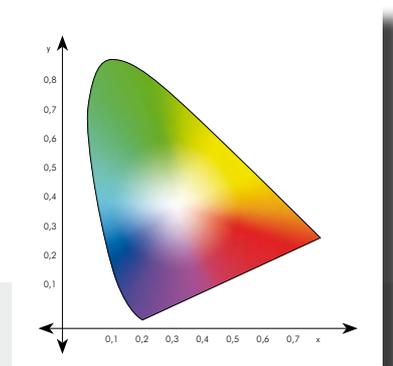
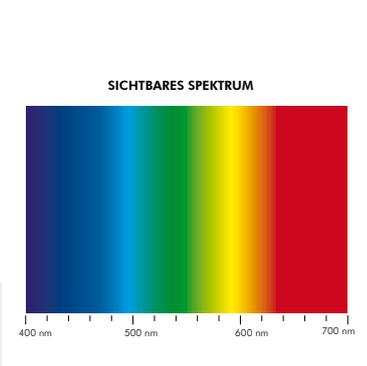


Die Transformation führt dazu, dass es für den CIE Lab-Farbenraum keine Farbtabelle gibt. In der durch die Werte  $(a^*, b^*)$  bzw.  $(C^*, h^*)$  definierten Farbebene können die Farben nicht mehr addiert werden.

Der CIE Lab-Farbenraum ist annähernd empfindungsgemäß (nicht absolut!) aufgebaut, er entspricht statistisch der visuellen Farbwahrnehmung des Menschen. Damit ist er nicht streng gleichförmig in der wahrnehmungs-psychologischen Beurteilung der Farben, erleichtert aber die Interpretation eines Farbpunktes und der farbmestechischen Abweichungen.

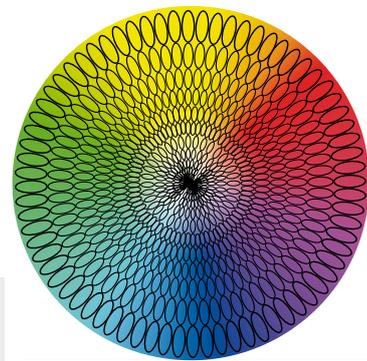
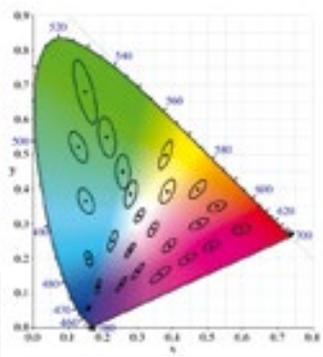
## Von der Farbe zur Farbmessung

In den vorangegangenen Kapiteln haben wir die Entwicklung der Farbmessung, von der visuellen Beurteilung bis zur Bestimmung einer Farbe anhand der Normfarbsysteme CIE31 und CIELab 1976, kennengelernt. Dabei haben wir Farbe immer einzeln oder isoliert betrachtet. In den folgenden Kapiteln werden wir uns mit der Beurteilung der Abstände zwischen zwei oder mehreren Farben und der Akzeptanz der Farben beschäftigen.



Vor der Farbmessung		
immer schon	1905-1915	
Sprache	Munsell-Atlas	CIE31
"rot" "kräftig" "hell"	Probe 2,5 R 5/12	X = 33,16 Y = 20,89 Z = 12,71  Für D65 / 2°
Eingeschränktes Vokabular	Vergleichbare Bestimmung	erste Berechnung
Entscheidung durch den Menschen		
SUBJEKTIV		

Von der Farbe ... zur Farbmessung  
 Von der Fachsprache ... zum CIE-Farbenraum 1931 ...  
 und zum CIE Lab-Farbenraum 1976  
 Vom Subjekt ... über das Objekt zur Messung



### Mit der Farbmessung

1931	1976	
Farbdreieck	CIE Lab-Farbraum	
$x = 0,4967$ $y = 0,3129$ Dominante $L_1 = 628 \text{ nm}$ Leuchtdichte = 46,9 % Für D65 / 2°	$L^* = 52,15$ $a^* = +51,72$ $b^* = +19,29$ Für D65 / 10°	$L^* = 52,15$ $C^* = 55,20$ $h = 20,45^\circ$ Für D65 / 10°
erste objektive Bestimmung	Bestimmung durch rechtwinklig dargestellte Koordinaten	Bestimmung durch zylindrisch dargestellte Koordinaten
Farbmestechnische Berechnung		
OBJEKTIV		

## Referenzenliste

- Farbe sehen, Corinna Watschke, 01.2009 [[www.planet-wissen.de](http://www.planet-wissen.de)],
- Farbmanagement in der Digitalfotografie (ISBN 3-8266-1645-6), 2006, Redline GmbH, Heidelberg
- Beschreibung und Ordnung von Farben, Farbmeterik, Farbmodelle, DMA Digital Media for Artists – Archiv 2006-2011, Kunstuniversität Linz, Gerhard Funk
- Messen – Kontrollieren – Rezeptieren, Dr. Ludwig Gall [[www.farbmeterik-gall.de](http://www.farbmeterik-gall.de)]
- Farbabstandsformeln, 2012, Fogra Forschungsgesellschaft Druck e.V. [[www.fogra.org](http://www.fogra.org)]
- Wikipedia, diverse Artikel über Farbe und Farbmessung [<http://de.wikipedia.org/wiki/Farbe>]
- Verschiedene Darstellungen von Farbmodellen und Farbräumen [[http://www.chemie-schule.de/chemieWiki\\_120](http://www.chemie-schule.de/chemieWiki_120)]
- Praktische Farbmessung, Anni Berger-Schunn, 2. überarbeitete Auflage, 1994, Muster-Schmidt Verlag, Göttingen – Zürich
- Farbabstandsformeln in der Praxis, SIP 01.2011
- Schläpfer, K.: Farbmeterik in der grafischen Industrie, 3. Aufl. St. Gallen; UGRA 2002 (Tabelle S. 48)

Publikationsdaten:

### Herausgeber:

Datacolor, Inc. 5 Princess Road, Lawrenceville, NJ 08648, USA

Telefon: 1-800-982-6497 | Fax: 609-895-7472 | [marketing@datacolor.com](mailto:marketing@datacolor.com) | [www.datacolor.com](http://www.datacolor.com)

### Text:

Gabriele Hiller, Hiller Direct Marketing, Stühren 41, 27211 Bassum, Deutschland

[www.hiller-direct-marketing.de](http://www.hiller-direct-marketing.de)

Oktober, 2019

© Copyright Datacolor. Alle Rechte vorbehalten.

### EUROPE

Datacolor AG Europe  
6343 Rotkreuz  
Telefon: +41 44.835.3800

### AMERICA

Datacolor Headquarters  
Lawrenceville, NJ  
Telefon: +1 609.924.2189

### ASIA

Datacolor Asia Pacific Limited  
Hong Kong  
Telefon: +852 24208283