

## Photometrische Farbmessungen

Photometrische Farbmessungen kommen in der Wasseranalytik sowie in der industriellen Produktion zum Einsatz und dienen generell der Qualitätsfeststellung. In der Praxis haben sich unterschiedliche Farbmessungen etabliert.

In der Vergangenheit basierte die „Farbmessung“ auf dem menschlichen Farbsehen, das jedoch stark von der individuellen Farbwahrnehmung sowie von äußeren Einflüssen, wie beispielsweise dem Umgebungslicht und der Helligkeit, beeinflusst wird. Erst mit dem Einsatz von Photometern und definierten und genormten Farbsystemen konnte die subjektive, visuelle Schätzung durch eine objektive und genaue Messung, abgelöst werden. Bei der Messung wird versucht, eine Farbe mit Hilfe von einem oder mehreren Zahlenwerten zu beschreiben. Dabei können unterschiedliche Methoden zum Einsatz kommen.

### Farbskalen

Manche Farbzahlen werden über einzelne oder mehrere definierte bzw. „genormte“ Wellenlängen berechnet. Die Grundlage bilden reproduzierbar herstellbare Farbstandards, von denen, von einer Stammlösung ausgehend, auf kleinere Färbungen verdünnt wird. Beispiele hierfür sind z.B. Jod-, Pt-Co/APHA/Hazen- und Gardner-Farbzahlen. Für einige Farbzahlen, wie z.B. Pt-Co/APHA/Hazen und Jod, gibt es keine definierten Berechnungsgrundlagen der photometrischen Bestimmung. Sie sind ausschließlich visuell definiert. In den jeweiligen Normen ist lediglich beschrieben, dass die Berechnung aus Normfarbwerten  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  bzw. Normfarbwertanteilen  $x$ ,  $y$ ,  $z$  unter Verwendung einer definierten Normlichtart und bei einem normalen Beobachterwinkel ( $2^\circ$  oder  $10^\circ$ ) gemäß CIE-Publikation 15:2004 erfolgen kann. Die Berechnung dieser Farbzahlen mit Spektralphotometern erfolgt daher mit Hilfe von herstellerspezifischen Methoden, die empirisch durch Messungen definierter Standards entwickelt wurden.

Andere Farbzahlen werden aus den Normfarbwerten oder sogenannten Tristimuluswerten  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  in dreidimensionale Farbräume wie CIE- $L^*a^*b^*$  oder CIE- $L^*u^*v$  umgerechnet. Grundlage dieser Farbräume ist das 1931 von der Internationalen Beleuchtungskommission (Commission Internationale de l'Éclairage, CIE) entwickelte Normfarbsystem.

### Wasseranalytik: Spektraler Absorptionskoeffizient

In der Wasseranalytik findet häufig der spektrale Absorptionskoeffizient, allgemein als SAK bezeichnet, Verwendung, um die Summe der gelösten

# Photometrie

## Kompendium

organischen Wasserinhaltsstoffe photometrisch zu bestimmen. In der Praxis haben sich SAK-Messungen bei zwei unterschiedlichen Wellenlängen etabliert. In der Wasserversorgung wird üblicherweise der SAK bei einer Wellenlänge von 436 nm zur Messung der Färbung verwendet. Die SAK-Messung bei der Wellenlänge von 254 nm wird vornehmlich in der Abwasserbranche angewandt und dient zur Bestimmung der organischen Belastung des Abwassers. Bei der Messung bei 254 nm handelt es sich jedoch um eine Messung im ultravioletten (UV) Bereiches des Lichtes; sie stellt daher keine Farbmessung dar und wird hier nicht weiter behandelt.

Trinkwasser sollte klar und farblos sein. Daher hat sich in der Wasserversorgung eine Messung der Färbung für die qualitative Bewertung des Wassers etabliert. Gelb und gelbbraune Färbungen von Trinkwasser, können beispielsweise durch Eisenverbindungen und Huminstoffe hervorgerufen werden. Aber auch Einbrüche von Fäkalien oder physikalisch-chemische Verunreinigungen können zu einer Gelbfärbung des Wassers führen. Generell wird unterschieden zwischen scheinbarer und wahrer Färbung. Die scheinbare Färbung wird durch gelöste Substanzen und Schwebstoffe einer nicht filtrierten Probe verursacht. Im Gegensatz dazu wird die wahre Färbung ausschließlich durch gelöste Substanzen hervorgerufen; die Probe muss vor der Messung mit einem Filter mit 0,45 µm Porenweite filtriert werden.

Für die Bestimmung der wahren Färbung des Wassers nach DIN EN ISO 7887, Verfahren B werden Messungen von drei unterschiedlichen Wellenlängen im sichtbaren Licht bei 436 nm, 525 nm, sowie 620 nm, mindestens jedoch bei 436 nm (SAK436), der filtrierten Wasserprobe durchgeführt. Der gemessene Wert wird auf 1 m optische Spaltbreite normiert (Einheit: 1/m). Einschränkend ist zu beachten, dass die SAK-Bestimmung nur sinnvoll angewendet werden kann, wenn sich die qualitative Zusammensetzung der Wasserinhaltsstoffe nicht stark verändert.

## Industrielle Anwendungen

In der Industrie spielt die Farbmessung eine wichtige Rolle bei der Überwachung von Produkten bzw. Produktionsprozessen. Einerseits kann die Farbe selbst eine charakteristische Eigenschaft des Produktes sein, die in bestimmten Grenzen eingehalten werden muß. Andererseits kann die Farbmessung bei farblosen Produkten zur Erkennung von Qualitätsmängeln benutzt werden, die beispielsweise durch Verschmutzung und/oder Alterung verursacht werden. Das Produkt wird also mit Hilfe der ermittelten Farbwerte beschrieben bzw. bewertet. In der Praxis kommen unterschiedlichste Farbmessungen zum Einsatz, die stark branchenabhängig sind.

## Hazen/APHA/Pt-Co-Farbzahl

Die Hazen/APHA/Pt-Co-Farbzahl wurde ursprünglich für Messung von schwach gelblich gefärbten Abwasserproben entwickelt. Heute wird die Hazen/APHA/Pt-Co-Farbzahl hauptsächlich in der chemischen oder in der pharmazeutischen Industrie als Qualitätsmerkmal für die Bewertung von Rohstoffen wie z.B. Fetten und Ölen herangezogen. Die Hazen/APHA/Pt-Co-Farbzahl wird benutzt, um Produktalterung durch Licht und Temperatureinflüsse, Produktverunreinigungen oder Prozessveränderungen zu detektieren. Sie ist nur für schwach gelblich gefärbte, fast wasserklare Proben anzuwenden und bezieht sich auf Platin-Kobalt-Standard Vergleichslösungen (DIN EN ISO 6271). Eine genaue Messvorgabe bzw. Berechnungsgrundlage gibt es in der DIN nicht. Die Messmethode ist somit herstellerspezifisch und reicht von Einzelwellenlängenmessungen bei unterschiedlichen Wellenlängen bis hin zur Bestimmung nach ASTM D5386-05 aus dem Yellowness-Index nach ASTM E 313, was jedoch einer Schätzung der Hazen/APHA/Pt-Co-Farbzahl entspricht.

Mit WTW-Spektralphotometern können die Hazen/APHA/Pt-Co-Farbzahlen bei unterschiedlichen Wellenlängen bestimmt werden:

- Wellenlänge 340 nm: Normierung erfolgt auf 10 mm, verwendbare Küvettengrößen sind 10mm, 20 mm und 50 mm sowie 16 mm Rundküvetten.
- Wellenlängen 445 nm, 455 nm und 465 nm: Normierung erfolgt auf 50 mm, und es können ausschließlich 50 mm Küvetten verwendet werden.

## Yellowness-Index

Der Yellowness-Index nach ASTM Methode E313 wird verwendet um Produktveränderungen durch Licht, chemische Einflüsse und Verarbeitungsschritte in Industrieanwendungen zu detektieren. Dabei wird die Abweichung einer durchsichtigen zu einer gelblichen Färbung bestimmt.

Der Yellowness-Index wird berechnet nach:

$$YI = \frac{100(C_x X - C_z Z)}{Y}$$

Wobei X, Y und Z die CIE-Normfarbwerte oder Tristimulus-Werte darstellen und die Koeffizienten  $C_x$  und  $C_z$  abhängig sind vom Betrachterwinkel ( $2^\circ$  oder  $10^\circ$ ) und der verwendeten Lichtart (C oder D65).

## EBC-Farbzahl

Die Europäische Bierfarbe oder EBC-Farbzahl (European Brewing Convention) stellt einen wichtigen Parameter für die Qualitätsüberwachung von Bier und

Würze im Brauprozess dar. Nach MEBAK 2.13.2 wird die EBC-Farbzahl mittels einer Extinktionsmessung bei 430 nm mit 10-mm-Küvetten nach folgender Formel bestimmt:

$$\text{EBC} = E_{430} * 25 * F$$

wobei  $E_{430}$  die Extinktion, gemessen bei der Wellenlänge 430 nm und F der Verdünnungsfaktor der Bierprobe darstellt.

Die Bierprobe muss gegebenenfalls verdünnt werden, wenn die unverdünnte Probe einen Extinktionswert von  $\geq 2$  aufweist.

Die typischen Bierfarbenbereiche sind für:

- Helle Biere 4–15 EBC
- Dunkle Biere 16–35 EBC
- Sehr dunkle Biere  $>35$  EBC

## ASBC-Farbzahl

Die US Amerikanische Bierfarbe ASBC Farbzahl (American Society of Brewing Chemists) kann nach der Standard Reference Methode (SRM) der ASBC durch folgende Umrechnungsformel aus der EBC Farbzahl berechnet werden:

$$\text{ASBC} = \text{EBC} / 1,97$$

## Gardner-Farbzahl

Die Gardner Farbzahl kann angewendet werden auf klare, gelbbraune, flüssige Proben wie Öle, Klarlacke und Lösungen von Fettsäuren, polymerisierten Fettsäuren, Harzen, Tallölen, Tallölfettsäuren, Kolophonium und andere Produkte. Die Berechnung aus CIE-L\*a\*b\* Werten nach DIN EN ISO 4630-2 ist über CIE-Normfarbwertanteile x und y definiert.

## Zuckerfarbe ICUMSA

Die Zuckerfarbmessung nach ICUMSA Method GS1/3-7 und Method GS2/3-10 kann angewendet werden für Lösungen von Roh-Zucker, Braun-Zucker und gefärbte Sirupe bei pH 7.0. Die Berechnung erfolgt nach folgender Formel:

$$a_s = 1000 * \frac{A_s}{b * c}$$

Wobei  $a_s$  der Absorptionsindex,  $A_s$  die Extinktion gemessen bei der Wellenlänge 420 nm, b die verwendete Schichtdicke in cm und c die Zuckerkonzentration in g/mL sind.

## ASTM-Farbskala (Mineralölerzeugnisse)

Die ASTM-Farbskala wird für Mineralölerzeugnisse wie Schmiermittel, Heizöle, Dieselkraftstoffe und Paraffine angewendet. Sie wird über CIE-Normfarbanteile X, Y, Z unter Verwendung der Normlichtart C und bei einem Normbetrachterwinkel von 2° definiert. Die Messergebnisse werden auf eine Küvettengröße von 32,5 mm normiert.

## ADMI-Farbzahl

Der Platin-Kobalt-Standard der American Public Health Association (APHA) wurde von dem American Dye Manufacturers Institute (ADMI) übernommen.

Die ADMI-Farbzahl wird für die Messung von Abwasser und Wasser verwendet, das in der Farbstärke der Platin-Kobalt-Farbskala ähnelt, dessen Farbton sich aber grundlegend von jener unterscheiden kann.

## Jodfarbzahl

Die Jodfarbzahl dient zum Bestimmen der Farbtiefe von klaren Flüssigkeiten, deren Farbbereich von farblos über gelblich bis dunkelbraun reicht, und der damit einer Jod-Kaliumjodid-Lösung ähnlich ist. Angewandt wird die Jodfarbzahl beispielsweise bei Lösungsmitteln, Weichmachern, Harzen, Ölen und Fettsäuren.

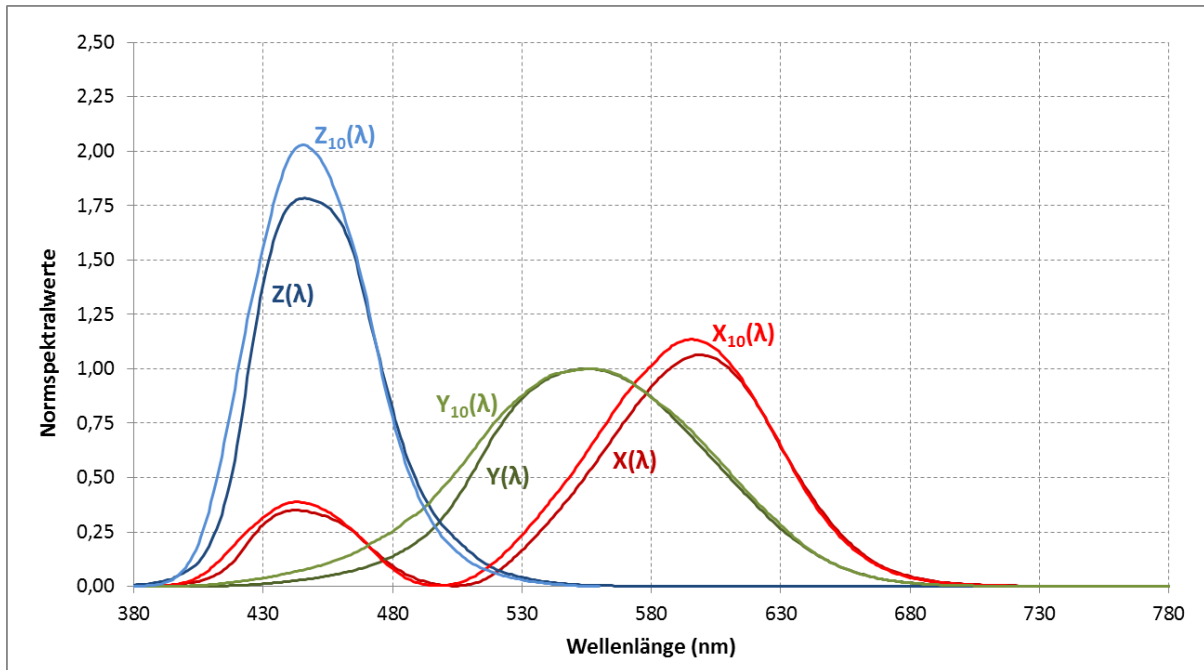
## Farbräume

Die Internationale Beleuchtungskommission (CIE - Commission Internationale de l'Éclairage) definierte 1931 das CIE-Normfarbsystem oder CIE-Normvalenzsystem, um die physikalischen Ursachen des Farbreizes und die menschliche Farbwahrnehmung in Verbindung zu setzen. Das Ziel war es, die menschliche Farbwahrnehmung reproduzierbar und eindeutig in Zahlenwerten auszudrücken.

Die menschliche Farbwahrnehmung erfolgt über drei unterschiedliche Farbrezeptorenzellen in der Netzhaut, die Rot, Grün oder Blau wahrnehmen. Daher beschreibt das CIE-Normfarbsystem eine Farbe über die drei Normfarbwerte, auch Tristimuli genannt, X (rot), Y (grün) und Z (blau). Für die Sehpigmente der drei Farbrezeptoren wurden die charakteristischen wellenlängenabhängigen Absorptionskurven, die sogenannten Normspektralwertkurven  $[X(\lambda), Y(\lambda), Z(\lambda)]$  im Bereich von 360 bis 830 nm bestimmt.

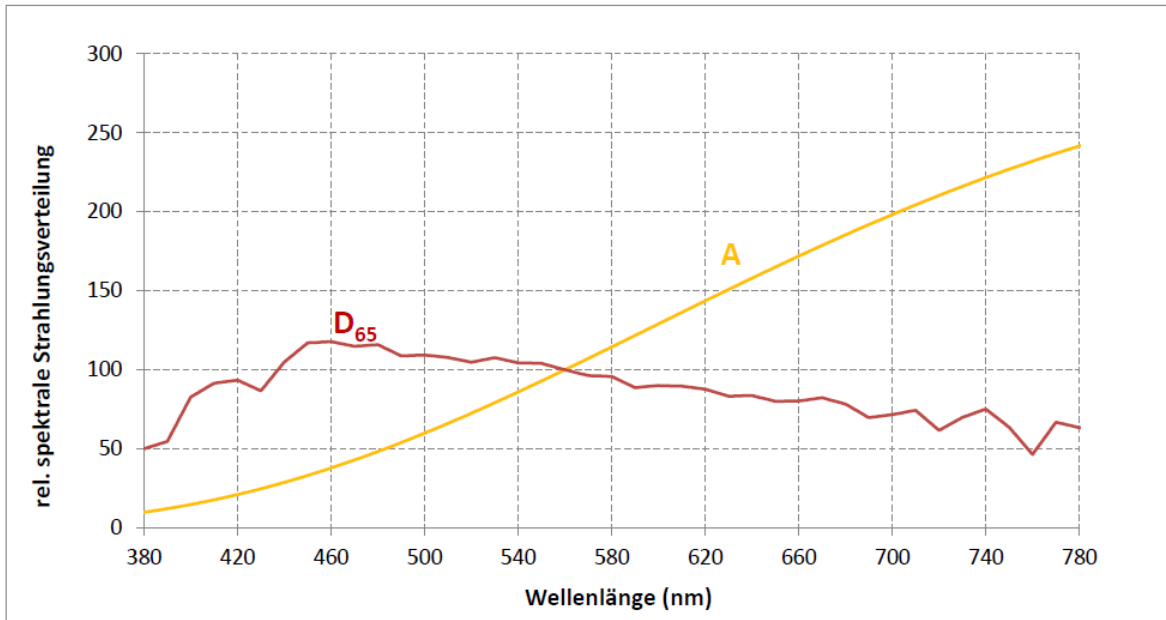
Für die Farbwahrnehmung sind neben den Rezeptoren noch das verwendete Licht bzw. die Lichtart sowie der Sehwinkel des Beobachters weitere wichtige Faktoren. Der Sehwinkel beeinflusst die Farbwahrnehmung, da die Verteilung der

Rezeptoren im Auge nicht gleich ist. Von der CIE wurden zwei unterschiedliche Betrachtungswinkel definiert, nämlich 1931 der 2°- und 1964 der 10°-Betrachterwinkel. Folglich gibt es für den 10°-Betrachterwinkel die Normspektralwertkurven  $X_{10}(\lambda)$ ,  $Y_{10}(\lambda)$ ,  $Z_{10}(\lambda)$ ] (Abb. 1).



**Abb. 1 Normspektralwertkurven für 2° und 10° Normalbetrachter.**

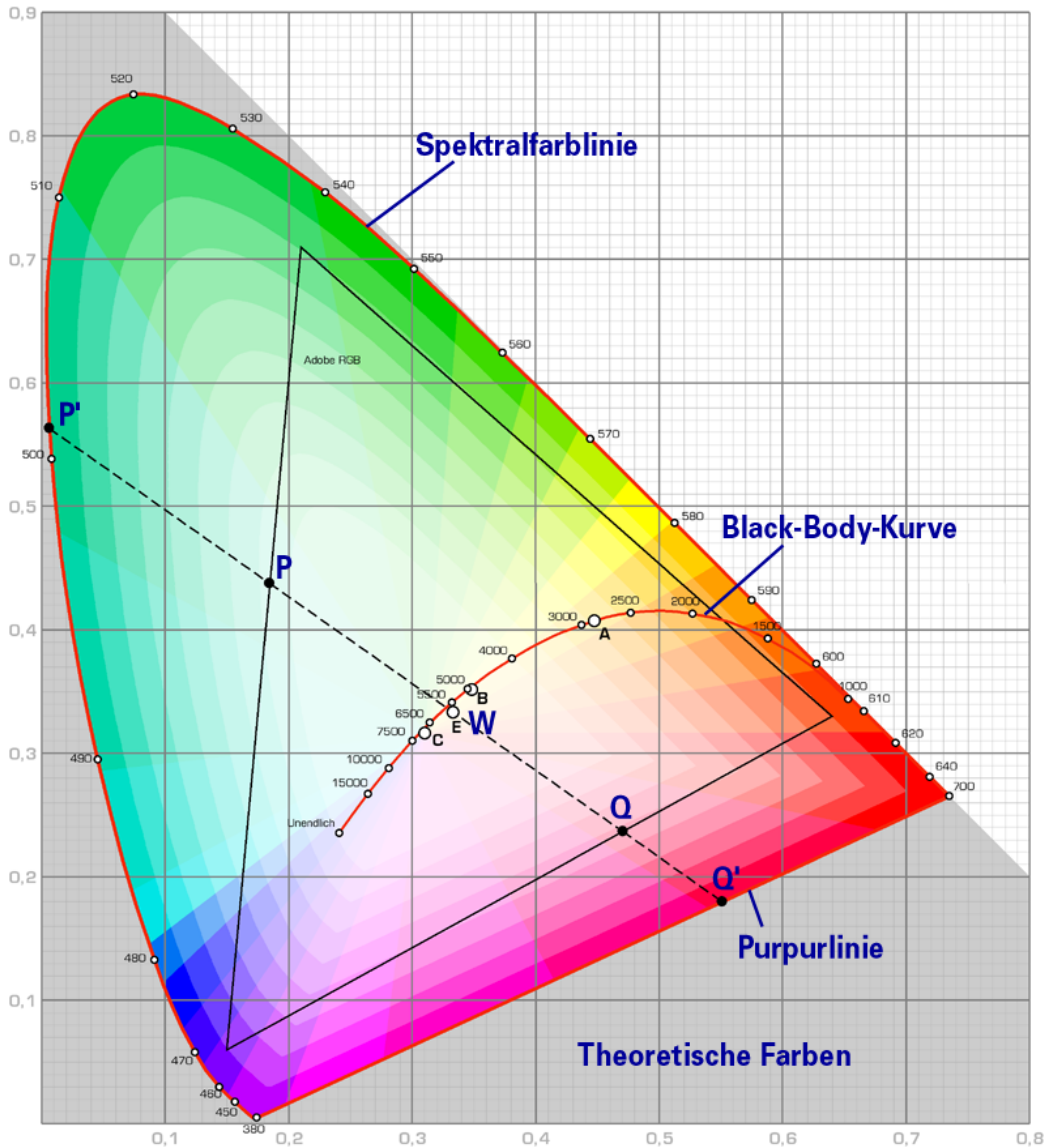
In dem CIE-Normfarbsystem wurden zwei unterschiedliche Lichtarten definiert, die unterschiedliche spektrale Energieverteilungen aufweisen: Lichtart A entspricht dem Licht einer 100-W-Wolframwendel-Glühbirne, Lichtart D65 entspricht dem Tageslicht. Mittlerweile sind weitere Lichtarten wie beispielsweise C, D50, D55 oder D75 dazugekommen. Die relativen spektralen Strahlungsverteilungen für die Normlichtarten sind ebenfalls in Tabellen erfasst. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die relative Strahlungsverteilung für die Lichtarten A und D65.



**Abb. 2** Relative spektrale Strahlungsverteilung der Normlichtarten A und D<sub>65</sub>

Für die eigentliche Farbmessung wird die Transmission über den Wellenlängenbereich von 380 bis 780 nm mit einem Spektralphotometer gemessen. Die Software errechnet mit Hilfe der Tabellenwerten der genormten Lichtenergieverteilung der eingestellten Lichtart sowie des eingestellten Betrachterwinkels die Normfarbwerte X, Y und Z bzw. die Normfarbwertanteile oder Farbkoordinaten x, y und z.

Trägt man die Normfarbanteile x und y der sichtbaren Spektralfarben des Wellenlängenbereiches von 380 bis 780 nm rechtwinklig gegeneinander auf, so erhält man eine gekrümmte Linie. Zusammen mit der Verbindung von Purpur zu Rot, der sogenannten Purpurlinie, umschließt diese eine Fläche. Diese umschlossene Fläche stellt die CIE-Normfarbtafel dar, die aufgrund der Form in der Umgangssprache auch als „Schuhsohle“ oder „Hufeisen“ bezeichnet wird (Abb. 3). Auf der äußeren parabelförmigen Linie liegen die reinen Spektralfarben.



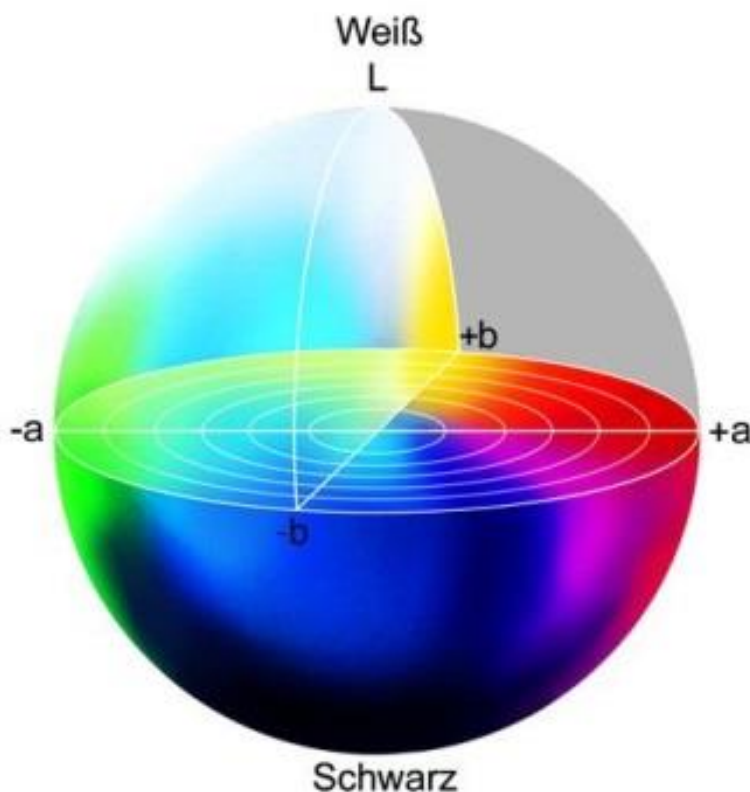
**Abb. 3** Die CIE-Normfarbtafel zeigt über CIE-Normfarbwertanteile  $x$ ,  $y$  alle reellen Farben nach Farbton und Farbsättigung. Das schwarze Dreieck in der Mitte stellt den Adobe-RGB-Farbraum dar. Quelle: Torge Anders, Wikipedia

Die Normfarbwerte oder Normfarbwertanteile geben mathematisch genau die Farbwahrnehmung des menschlichen Auges wieder. Der Nachteil dieser Farbwerte ist, dass sich unter diesen Zahlenwerten kaum jemand eine Farbe vorstellen kann. Daher bilden sie die Grundlage für die anschließende Umrechnung in unterschiedliche Farbräume, die der Farbenlehre entsprechen, und somit leichter verständlich sind.



## CIE-L\*a\*b-Farbraum

Der CIE-L\*a\*b-Farbraum ist ein sehr häufig verwendetes Farbsystem. Die gemessenen Spektralkurven werden auf die drei Koordinaten L, a und b reduziert, wobei die Achsen der Koordinaten jeweils senkrecht zueinander stehen (Abb. 4). Die L-Koordinate ist normiert auf die Werte von 0 bis 100 und beschreibt die Helligkeit der Farbe, enthält selber aber keine Farbinformation. Ein Wert von 100 bedeutet 100 % Licht (Weiss), ein Wert von 0 entspricht 0 % Licht (Schwarz). Die Koordinaten a und b enthalten die eigentlichen Farbinformationen, sie sind nicht normiert und reichen von negativen zu positiven Werten. Auf der a-Koordinatenachse sind die Komplementärfarben Rot und Grün angeordnet; Rot im positiven und Grün im negativen Bereich. Je positiver bzw. negativer die Koordinate a ist, desto kräftiger ist die Farbe Grün bzw. Rot. Analog dazu stellt die b-Koordinatenachse die Komplementärfarben Gelb und Blau dar. Sind die a oder b Zahlenwerte gleich Null, so liegt keine Farbe vor, sondern in Abhängigkeit des L-Wertes ein Grauton, bzw. Weiß oder Schwarz.



**Abb. 4:** Schematische Darstellung des 3-dimensionalen CIE-L\*a\*b-Farbraumes.

# Photometrie Kompendium

---

## CIE-L\*u\*v Farbraum

Der CIE-L\*u\*v-Farbraum ist dem oben beschriebenen CIE-L\*a\*b Farbraum sehr ähnlich. Die Berechnung aus den CIE-Normfarbwerten erfolgt mit einer anderen Formel, so dass erreicht wird, dass der Grünbereich verkleinert und der Blaubereich vergrößert dargestellt wird. Insgesamt erhält man eine relativ gleichabständige Darstellung des Farbraumes. Die Achse der Komplementärfarben Grün-Rot wird mit u, die von Gelb-Blau mit v bezeichnet.