



Grundlagen der Farbmetrik



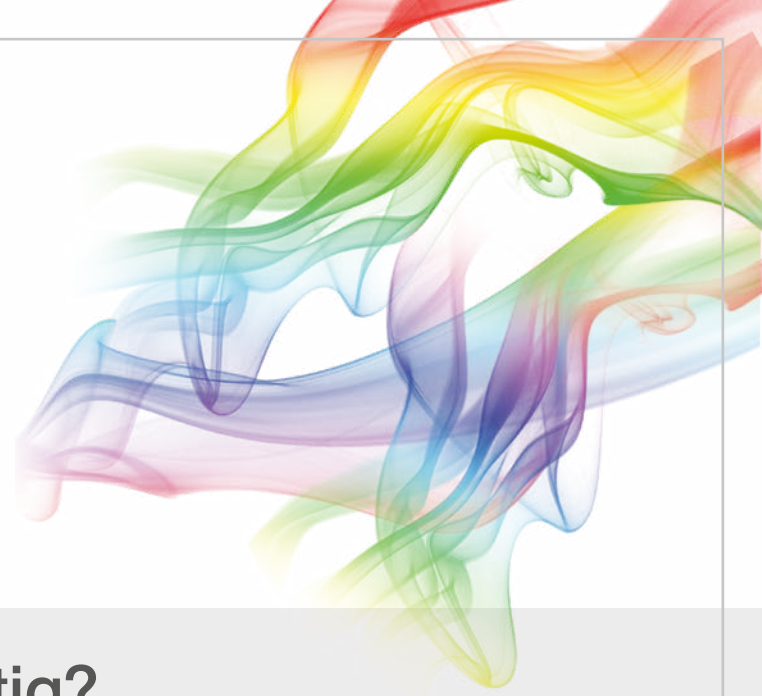
Leitfaden zur
industriellen Farbmessung

Was ist Farbe?

Farbe ist ein individueller, visueller, durch Licht hervorgerufener Sinneseindruck.

Farbempfindung ist subjektiv und abhängig von Alter, Geschlecht und Tagesform. Gleichzeitig spielen Faktoren wie Beleuchtung, Hintergrund und Oberflächenstruktur eine wichtige Rolle.

Der Mensch hat keine „Farbskala“. Im Gehirn entsteht ein individueller Farbeindruck, was eine adäquate Farbbeschreibung sowie Dokumentation unmöglich macht. Die wahrgenommene Farbe entsteht durch Rezeptoren, auf der Netzhaut. Für die Farbwahrnehmung sind ca. 6 Millionen Zapfen, für den Hell-/Dunkelkontrast ca. 120 Millionen Stäbchen verantwortlich.



Wie messe ich Farbe richtig?

Um gleichbleibende Ergebnisse zu erhalten muss eine reproduzierbare Messmethode mit folgenden festgelegten Messbedingungen erstellt werden:

Darauf ist bei der Farbmessung zu achten:

- Die Probenoberflächen sollen so sauber wie möglich sein. Fingerabdrücke, Kratzer, Staub und Rückstände von Reinigungsmitteln verfälschen die Ergebnisse.
- Bei gekrümmten Oberflächen soll die Messung immer an der gleichen, möglichst gering gekrümmten Stelle durchgeführt werden, um ein reproduzierbares Messergebnis zu erhalten.
- Es ist auf eine optimale Positionierung der Proben zu achten, da bereits eine geringe Änderung des Abstands zur Probe zu einem veränderten Messergebnis führt.
- Eine konstante Oberflächentemperatur ist für vergleichbare Ergebnisse wichtig, da unterschiedlichen Temperaturen zu Abweichungen führen können. Proben in bester Qualität sollen als repräsentative Urmuster qualifiziert werden.
- Eine regelmäßige Kalibrierung ist die Voraussetzung für reproduzierbare Messergebnisse. Diese sollte unter den gleichen Umgebungsbedingungen wie die spätere Messung stattfinden.

Reproduzierbare Messmethoden, Messbedingungen

- **Festlegung der Probe (Körper oder Licht)**
- **Festlegung der Messpunkte**
- **Festlegung der zulässigen Toleranz**
- **Festlegung der Messbedingungen:**
 - Farbraum / Farbwerte ($L^*a^*b^*$, XYZ, Luv, ...)
 - Abstandsmodelle (ΔE , ΔE_{cmc} , Zylinder, Box ...)
 - Lichtart (D50, D65, A oder weitere)
 - Normalbeobachter (2° oder 10°)
 - Messgeometrie (gerichtet oder diffuse Beleuchtung)
 - Messmodus (Reflexion in Aufsicht oder Transmission in Durchsicht)
 - Anzahl der Messungen
- **Festlegung der Referenzierung mit Weiß-/Schwarz-/Grün-Standard**



Nur Messungen unter gleichen Bedingungen sind vergleichbar.

Es sind auf konstante Rahmenbedingungen bei den Messungen zu achten.

Grundlagen der Farbmessung

Um eine Grundlage für eine weltweite Farbkommunikation und genormte Farbmaßsysteme zu schaffen, wurde 1931 die CIE (Commission internationale de l'éclairage, Internationale Beleuchtungskommission) gegründet. Diese ist für die Überwachung und Prüfung international anerkannter Werte von Farbe verantwortlich. Definiert wurde der Beobachter (siehe auch Abschnitt „Normalbeobachter“) durch eine Studie, an der Menschen mit individuellem Farbpfinden teilgenommen haben.

Die Beurteilung von Farbe basiert auf den Eigenschaften:

- **Bunton:** Die Unterscheidung von Farben wie z.B. rot, grün, blau, gelb, etc.
- **Helligkeit:** Intensität der Lichtempfindung, lässt eine Farbe dunkler oder heller wirken
- **Buntheit:** Intensität der Farbe zu einem Grau (unbunt) mit der gleichen Helligkeit
- **Sättigung:** beschreibt das Verhältnis der Buntheit zur Helligkeit

Spektrum

Der Mensch kann Farbreize zwischen 380 nm Violett und 780 nm Rot wahrnehmen und bis zu 10 Millionen Farbtöne unterscheiden

Farbräume

Das Auge hat drei Farbrezeptoren (L = long, M = middle, S = short). Daher verwendet man 3D-Farbmodelle um Farben eindeutig zu identifizieren und untereinander zu vergleichen (s. Farbabstand). In der Industrie hat sich der $L^*a^*b^*$ -Farbraum etabliert.

Normfarbraum CIE 1931 (xyY Farbraum)

Dieser Farbraum entspricht der Farbempfindung des Menschen. (sehr großer Grün- und kleiner Blau- / Rot-Bereich).

x und y = Farbvektoren, die den Bunton und die Buntheit beschreiben.

Y = die Helligkeit ist normiert von 0 bis 100

W = Weißpunkt ($x=y=z=1/3$)

Spektrallinien = „reine“ Farben

Black-Body-Kurve = Farbe als Temperatur eines idealen schwarzen Strahlers
Geeignet zur Grün- und Weißleuchter- (LED-) Prüfung.

Normfarbraum CIELAB76

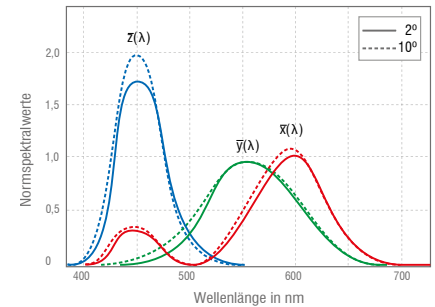
Der $L^*a^*b^*$ -Farbraum umfasst alle für das menschliche Auge erkennbare Farben. In diesem 3D-Farbmodell wird jeder Bunton in etwa mit dem gleichen Flächenvolumen beschrieben. Der $L^*a^*b^*$ -Farbraum hat sich in der Industrie etabliert und wird von allen Geräteherstellern zur Farbprüfung verwendet. Jede Farbe ist durch den Farbort (L^* ; a^* ; b^*) beschrieben

L^* = Helligkeit (schwarz = 0; weiß = 100)

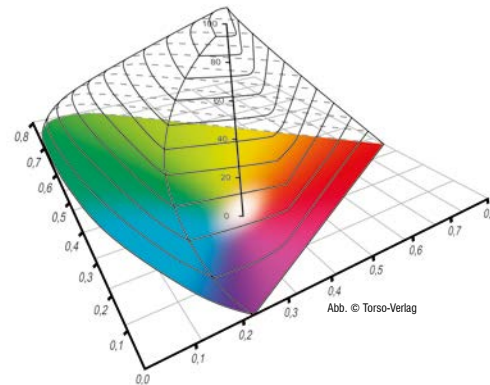
a^* = Grün- / Rot-Buntheit (grün = -100; rot = +100)

b^* = Blau- / Gelb-Buntheit (blau = -100; gelb = +100)

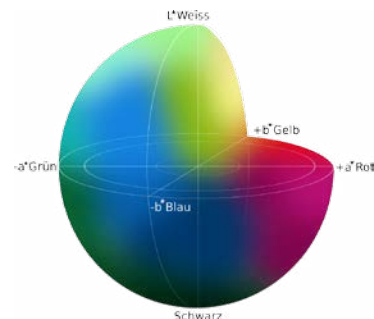
Ebenso wurden die Lichtquellen wie beispielsweise Leuchtstoffröhren, Kerze, Sonne etc. als Lichtarten definiert. Wird ein Muster mit einem Farbmessgerät gemessen, sind die Faktoren Lichtart und Beobachter genormte Parameter, welche eingestellt werden können und internationale Gültigkeit haben. Die Farbwahrnehmung der Probanden wurde in den Normspektralwertfunktionen \bar{x} (lang-), \bar{y} (mittel-) und \bar{z} (kurzwellig) festgelegt.



Jede wahrnehmbare Farbe kann so durch ihre Eigenschaften einem exakten Farbort in einem Farbraum zugeordnet und weltweit kommuniziert werden.



xyY Farbraum



$L^*a^*b^*$ -Farbraum

HSV-/HSI-Farbraum

Die Farben im HSV-Farbraum sind mit Hilfe des Bunttons, der Buntheit und der Helligkeit definiert und vereinheitlicht einige Farbmodelle wie HSV / HSL / HSI.

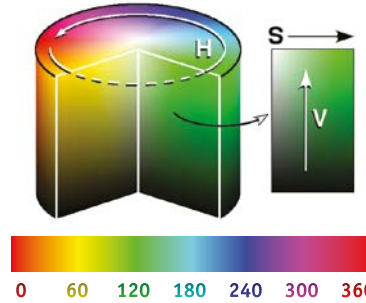
Jede Farbe ist durch den Farbort (H; S; V) definiert

H= (Hue) Buntton (rot = 0°; grün = 120°; blau = 240°)

S= (Saturation) Buntheit (neutralgrau = 0%; „reine“ Farbe = 100 %)

V= (Value) Helligkeit

I = (Intensity) Lichtintensität (dunkel = 0%; ganz hell = 100%)



HSV-/HSI-Farbraum

Farbabstand ΔE

Je weiter die Farben voneinander im Farbraum entfernt sind, desto deutlicher ist der Farbunterschied fürs Auge. Dies ist als Farbabstand ΔE definiert.

Delta E; ΔE ; dE = ein Maß für den empfundenen Farbabstand zweier Farben (DIN 5033)

$$\Delta E = \sqrt{(L_p^* - L_v^*)^2 + (a_p^* - a_v^*)^2 + (b_p^* - b_v^*)^2}$$

Ein ΔE von 11,61 entspricht dem Unterschied zwischen Probe (p) und Vergleich (v)

$$\Delta E = \sqrt{(60^* - 55^*)^2 + (-38,6^* - (-30)^*)^2 + (-46^* - (-52)^*)^2} = 11,62$$

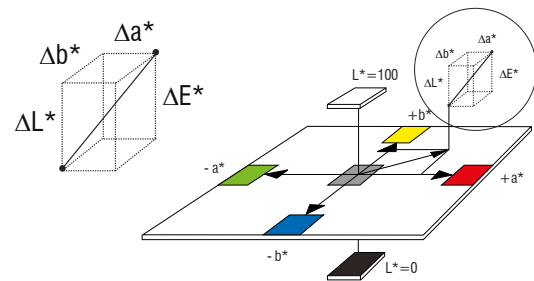
Interpretation:

- $\Delta E > 5$ großer Farbunterschied
- $\Delta E 0,5 \dots 1$ entspricht menschlicher Wahrnehmungsgrenze
- $\Delta E < 0,3$ Forderung in der Papierindustrie
- $\Delta E < 0,1$ Forderung in der Automobilindustrie

Normlichtarten und Lichtquellen

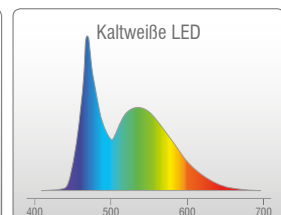
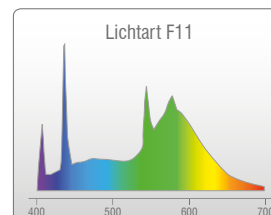
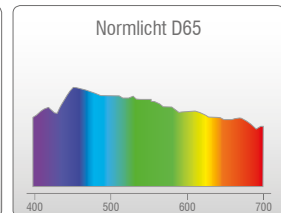
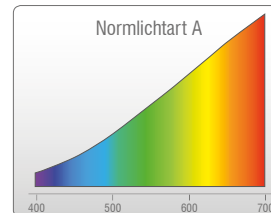
Normlichtarten sind von 380 bis 780 nm festgelegt

- **Normlichtart A** = Glühlampe mit 2865 k
- **Normlicht D65** = mittleres Tageslicht mit ca 6500 k
- **Lichtart F11** = Leuchtstofflampen
- **Kaltweiße LED**



Probe (p)

Vergleich (v)



Normalbeobachter

Es gibt zwei Arten, die über die drei Empfindlichkeitskurven der Zapfenarten definiert wurden:

Der 2° Beobachter (1931)

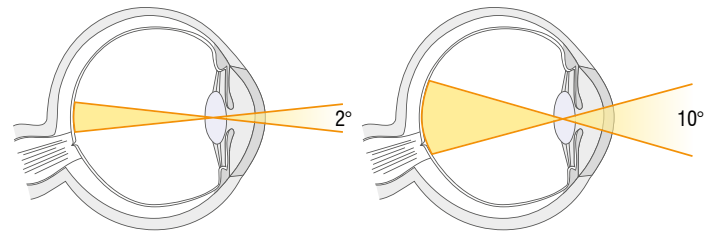
- Distanz 30 cm = 1 cm Gesichtsfeld
- Fokus auf kleine Fläche der Netzhaut (gelber Fleck)
- Schlechte Übereinstimmung mit visuellem Empfinden

Ein Gegenstand von der Größe des Daumennagels hat bei einem Seh-
abstand des ausgestreckten Armes einen Öffnungswinkel von ungefähr 2°.

Der 10° Beobachter (1964)

- Distanz 30 cm = 5 cm Gesichtsfeld (in der Praxis Standard)
- Fokus auf große Fläche der Netzhaut (gelber Fleck + Randgebiete)
- Gute Übereinstimmung mit visuellem Empfinden

Bei ausgestrecktem Arm entspricht dies etwa der Handfläche ohne die
Finger. Als Normspektralwertkurven bzw. -funktionen bezeichnet man die
Empfindlichkeitskurven von Normalbetrachter. Die Berechnungsgrundlage
für den gewählten Beobachter sind die spektralen Werte für \bar{x} \bar{y} \bar{z} , die in der
DIN 5033 hinterlegt sind.



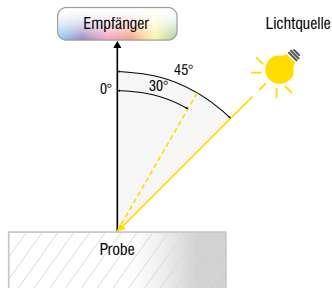
Normalbeobachter

Menschen sehen Farben unterschiedlich. Um eine einheitliche
Bewertung zu ermöglichen, legte die Internationale Beleuchtungs-
kommission (CIE) spektrale Bewertungsfunktionen fest.

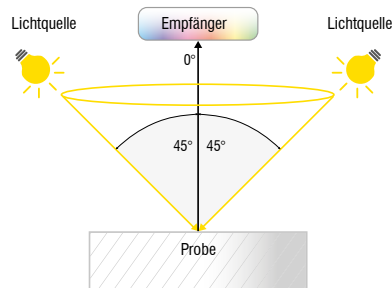
Diese Funktionen beschreiben, wie ein Mensch Farbe wahrnimmt.
Sie basieren auf experimentell bestimmter Empfindlichkeitskurven
der langwelligen L (X)-, mittelwelligen M (Y)- und kurzwelligen
S (Z)-Zapfen.

Messgeometrien

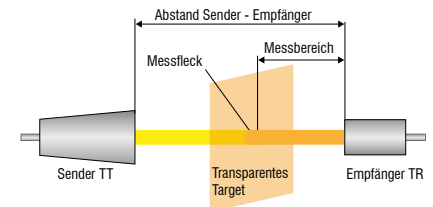
Die hier beschriebenen Messgeometrien entsprechen dem Farbsehen des menschlichen Auges.



Messgeometrie 30°x:0°; 45°x:0°
Das Muster wird unter 30° bzw. 45° beleuchtet
und unter 0° gemessen



Messgeometrie R45°c:0°
Das Muster wird unter 45° beleuchtet und unter 0° gemessen.
Eine Rundumbeleuchtung minimiert den Struktureinfluss der Ober-
fläche. Eine Orientierungsfestlegung ist nicht mehr notwendig.



Transmissionssensor bestehend aus Sender
(TT) und Empfänger (TR) 0°:180°

Allgemeines

Metamerie: bedeutet, dass ein Probenpaar unter einer Lichtquelle gleich, jedoch unter einer anderen Lichtquelle unterschiedlich aussieht.

Bei **strukturierten Flächen** sollte in allen vier Richtungen geprüft und durch die Prüfung an verschiedenen Stellen ein Mittelwert gebildet werden oder man beleuchtet den Prüfling aus allen Richtungen (Ringbeleuchtung R45°:0°) und misst an einer Position.

Sind die **Proben durchscheinend**, ist darauf zu achten, dass ein definierter Hintergrund oder durch Falten der Probe eine ausreichende Schichtstärke für die Prüfung gegeben ist. Alternativ kann als Hintergrund eine Beleuchtung verwendet werden um in Transmission (0°:180°) zu prüfen.

Mittelwertbildung: wird ermittelt, indem an einer Probe an verschiedenen Stellen oder an einer Stelle mehrere Messungen durchgeführt und die Werte verrechnet werden.

Die **Farbtemperatur** bezieht sich auf die Temperatur, mit der man theoretisch einen schwarzen Körper aufheizen müsste um Licht in der gleichen Farbe abzugeben. Die Farbtemperatur wird in Kelvin (K) gemessen.

RGB-Farbraum: hier werden die Farben aus Rot (R), Grün (G) und Blau (B) gemischt. Der RGB-Farbraum ist ein additiver Farbraum, d.h. alle drei Farben zusammen ergeben Weiß. Schwarz ergibt sich, bei R/G/B = 0/0/0.

Der RGB Farbraum hat sich in der Darstellungsindustrie etabliert, spielt jedoch in der industriellen Messtechnik keine Rolle, da es nicht möglich ist alle Farben darzustellen und zu messen.

