



Grundlagen der Farbmessung

Leitfaden zur
industriellen Farbmessung

Was ist Farbe?

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

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

Farbsensoren versuchen, die menschliche Farbwahrnehmung zu imitieren.

Die industrielle Farbmessung ist eine große Herausforderung, da Farbe ein individueller, visueller, durch Licht hervorgerufener Sinneseindruck ist. Daher geht es immer um den Vergleich zwischen der gemessenen zur eigentlich wahrgenommenen Farbe durch das menschliche Auge. Bei den meisten Messaufgaben ist daher entscheidend, dass kleinste Farbabweichungen erkannt werden müssen, die auch vom menschlichen Auge wahrgenommen werden.



Warum industrielle Farbmessung?

In zahlreichen Branchen steht Farbe für Qualität. Insbesondere bei Konsumgütern, mit denen der Endverbraucher in Berührung kommt, beeinflusst der exakte Farbton die Wertigkeit und Identität des Produkts und auch der Marke. Daher ist es entscheidend, den richtigen Farbton in der Herstellung zu treffen und diesen über Produktchargen hinweg homogen zu fertigen.

Neben dem Qualitätseindruck kann Farbe als indirekte Messgröße herangezogen werden und zur Prozesssteuerung genutzt werden. Beispielsweise werden Farbsensoren zur Anwesenheitserkennung von Klebeauftrag, zum Sortieren von Teilen oder zur Bestimmung von Inhaltsstoffen eingesetzt.



Viel mehr als Farbmessung

- ✓ Detektion von Farbringen
- ✓ Farbwerte auslesen und statistisch auswerten
- ✓ Farbmarkenerkennung in der Druckindustrie
- ✓ Farb- und Graustufenerkennung
- ✓ Verpackungskontrolle
- ✓ Sortieraufgaben nach Farbe
(z.B. O-Ring-Kontrolle, Verschlüsse, Kronkorken, Etiketten)
- ✓ Farberkennung an Interieurteilen/Exterieurteilen
- ✓ Einfärbung von Flüssigkeiten
- ✓ Grau Abstufungen von Beton- / Pflastersteinen
- ✓ Innenwandbeschichtung von Dosen
- ✓ Oberflächenveredelung
- ✓ Material- / Beschichtungsunterscheidung

Welche Arten der Farbmessung gibt es?



In der industriellen Farbmessung existieren zwei grundlegende Prinzipien zur Bestimmung von Farben:

Bei der absoluten Farbmessung wird die Farbe von Objekten bestimmt.

Bei der relativen Farbmessung wird die erfasste Farbe mit einer Referenzfarbe verglichen.

Gemessen und ausgewertet wird dazu die Reflexion von Wellenlängen im sichtbaren Bereich. Je nach Verteilung und Zusammensetzung der Wellenlängen-Anteile ergibt sich daraus ein messbarer Farbton. Dafür sind jedoch gewisse Rahmenbedingungen (Beobachter, Beleuchtung, Abstand, ...) möglichst gleich und konstant zu halten (vgl. Seite 6).



Absolute Farbmessung

Von einer absoluten Farbmessung wird gesprochen, wenn der Farbabstand des Targets zu den absoluten, geräteunabhängigen Koordinaten einer Referenzfarbe ermittelt wird (ΔE_{abs}). Die Messungen müssen mit der gleichen, nicht zwingend genormten Lichtquelle vorgenommen werden. Werden alle Normbedingungen zur Farbmessung eingehalten, spricht man von einer Norm-Farbmessung.

Wichtigstes Merkmal der farbmessenden Sensoren von Micro-Epsilon ist die hohe Genauigkeit. Da die Farben aus dem gesamten Farbspektrum bestimmt werden, können die absolut messenden Systeme für Steuerungs- und Regelungsaufgaben verwendet werden.



Zur absoluten Farbmessung wird das colorCONTROL ACS7000 eingesetzt.

Relative Farbmessung

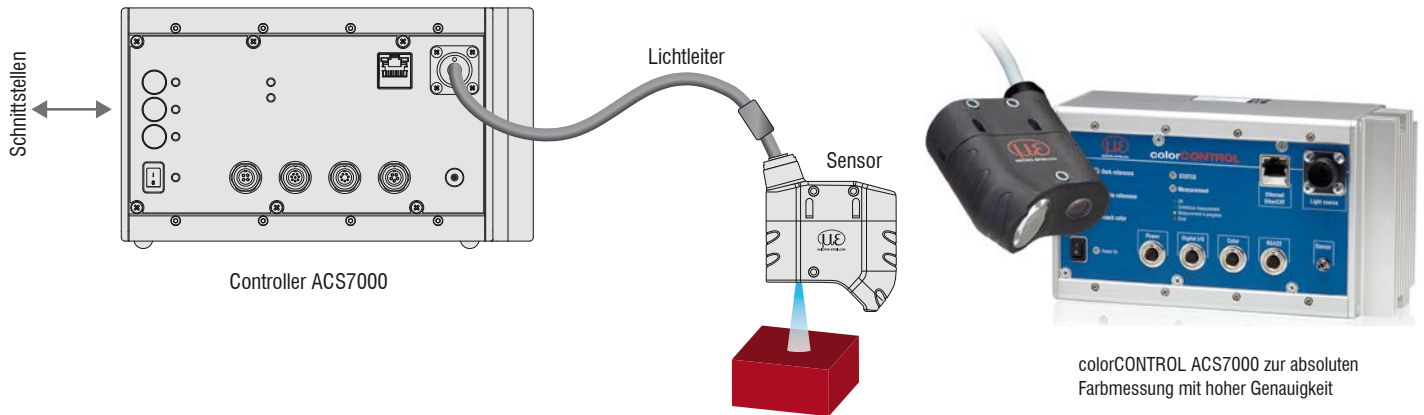
Die relative Farbmessung wird oft auch als Farbprüfung bezeichnet. Dabei wird der Farbabstand zwischen Messobjekt und Referenzmuster mit dem gleichem Sensor ermittelt (ΔE_{rel} , siehe Seite 9).

Wichtiges Merkmal farbprüfender Sensoren von Micro-Epsilon ist, dass diese primär dafür ausgelegt sind, Farbe direkt im Sensor mit einer eingelernten Referenzfarbe zu vergleichen. Als Resultat wird letztlich ein bewertetes Ergebnis als Ausgangs- bzw. Schaltsignal (Gut/Schlecht) ausgegeben.



Zur relativen Farbmessung werden die True-Color-Sensoren colorSENSOR CFO100 & CFO200 eingesetzt.

Sensoren zur absoluten Farbmessung



Im Bereich der absoluten Farbmessung beinhaltet das Micro-Epsilon Portfolio den colorCONTROL ACS7000. Der Controller kann mit drei verschiedenen Sensortypen betrieben werden. Die Sensorkabel bestehen aus Glasfaserlichtwellenleitern die fest mit dem Sensor verbunden sind.

Die Sensoren und die Adapter zur taktilen Farbmessung bieten zahlreiche Applikationsmöglichkeiten für die Inline-Farbmessung. Darüber hinaus eignet sich das Gerät aufgrund der hohen Präzision auch bestens für den Laboreinsatz oder zur Qualitätssicherung.

colorCONTROL ACS7000

- ✓ Absolute Farbmessung, ideal für präzise Messungen in Labor, Qualitätssicherung und Fertigungslinie
- ✓ Messgeschwindigkeit bis max. 2 kHz
- ✓ Hohe Reproduzierbarkeit: $\Delta E \leq 0,08$ (5 nm)
- ✓ Farbraumwahl: XYZ; $L^*a^*b^*$; $L^*C^*h^\circ$ oder $L^*u^*v^*$
- ✓ Schnittstellen: Ethernet, EtherCAT, RS422, digital I/O



ACS1 Winkelsensor
Für Standard-Messaufgaben



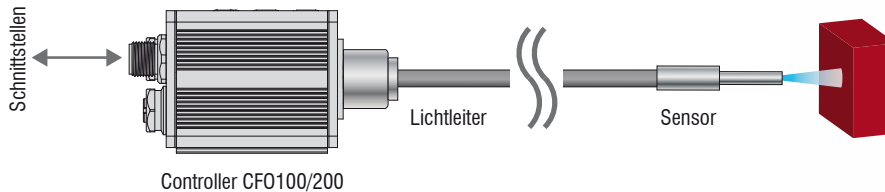
ACS2 Ringsensor
Für strukturierte, hochreflektierende und metallisch-glänzende Oberflächen



ACS3 Transmissionssensor
Für (semi-)transparente Objekte



Sensoren zur relativen Farbmessung



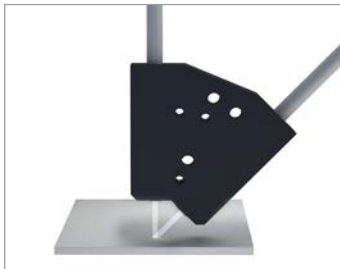
colorSENSOR CFO100 / CFO200
TrueColor Sensoren zur präzisen Farberkennung

Die colorSENSOR CFO Serie von Micro-Epsilon ist zur relativen Farbmessung (Farbprüfung) konzipiert. Ein Kanal setzt sich üblicherweise aus Sensor, Lichtleiter und Controller zusammen.

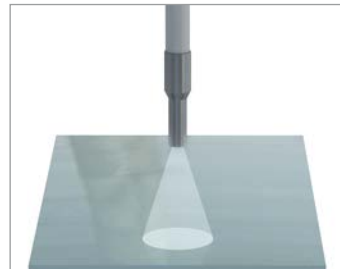
Im Controller ist neben der Hochleistungslichtquelle auch die Auswerteeinheit integriert. Der Controller leitet das Licht über den Lichtleiter zum Sensor (bzw. Tastkopf/Messkopf) weiter. Der Sensor weitet das Licht an der Messstelle auf das Messobjekt auf. Es stehen eine Vielzahl von verschiedenen Sensoren mit unterschiedlicher Messanordnung, Messflecken- und Abstände zur Verfügung. Das vom Messobjekt reflektierte Licht wird über den Lichtleiter zurück in den Controller geleitet und dort vom True-Color-Chip ausgewertet.

colorSENSOR CFO100 / CFO200

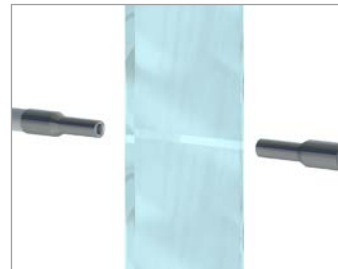
- ✓ Relative Farbmessung, ideal für schnelle Farberkennung in Automatisierung, Fertigungsüberwachung und Qualitätskontrolle
- ✓ Messgeschwindigkeit bis max. 30 kHz
- ✓ Hohe Farbauflösung: $\Delta E \leq 0,3$
- ✓ Bedienung: Web-Browser, Folientastatur



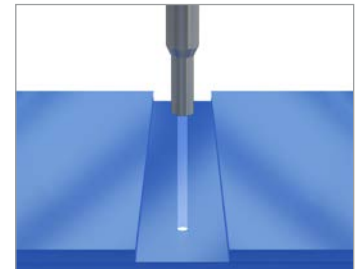
CFS1 Winkelsensor
Messung auf Hochglanzoberflächen



CFS2 Ringsensor
Messen von strukturierten Oberflächen, Metallic Effekt Lackierungen oder Hochglanz-Oberflächen



CFS3 Transmissionssensor
Messung von Farbänderungen von Flüssigkeiten, Farbmessung von transluzenten Folien



CFS4 Reflexsensor
Bestens geeignet für Metall, Kunststoffteile, Beschichtung und Verpackungen; ideal für direkte Reflexion inkl. Glanz

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.

Mehrkanal-Farbmessung

Synchrone Farbmessung mit mehreren Controllern

Bei der synchronen Farbprüfung mit colorSENSOR CFO Sensoren auf ein identisches Messobjekt kann die Farbwertanzeige – beispielsweise im Webinterface – variieren. Da die Farbmessung relativ zu einer identischen Referenz erfolgt, spielt diese Abweichung keine Rolle in der Prozessüberwachung.

Um identische Farben in der Anzeige zu erhalten, empfiehlt sich eine Werkskalibrierung der Controller. Werden mehrere colorCONTROL ACS Controller zur synchronen Datenerfassung verwendet, ist keine Kalibrierung erforderlich, da jeder Controller absolute Farbwerte ermittelt.



Grundlagen der Farbmessung

Normalbeobachter

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

Der 2° Beobachter (1931)

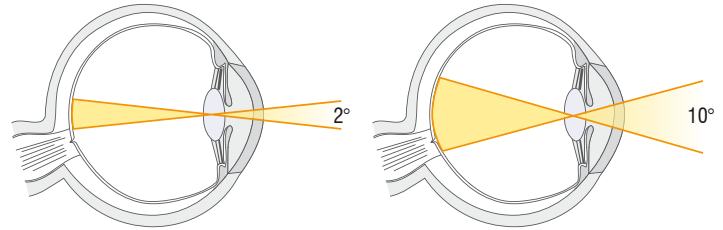
- Distanz 30 cm = 1 cm Gesichtsfeld
- Fokus auf kleine Fläche der Netzhaut (gelber Fleck)
- Schlechte Übereinstimmung mit visuellem Empfinden

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.



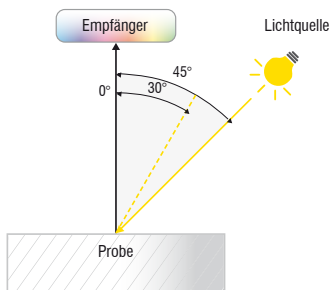
Normalbeobachter

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

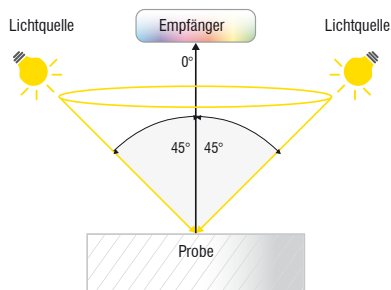
Diese Funktionen beschreiben, wie ein Mensch Farbe wahrnimmt. Sie basieren auf experimentell bestimmter Empfindlichkeitskurven der langwelligen L (X)-, mittelwelligen M (Y)- und kurzwelligen S (Z)-Zapfen.

Messgeometrien

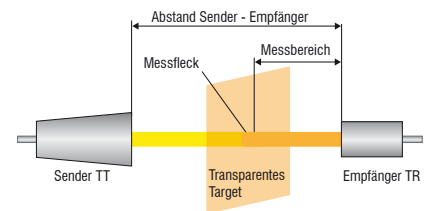
Die hier beschriebenen Messgeometrien entsprechen dem Farbsehen des menschlichen Auges.



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 Rundbeleuchtung minimiert den Struktureinfluss der Oberfläche. Eine Orientierungsfestlegung ist nicht mehr notwendig.



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

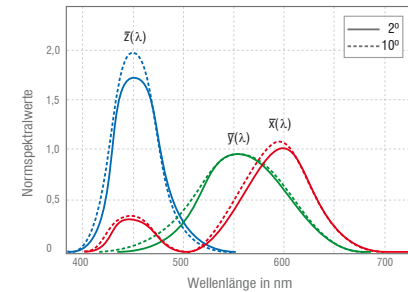
Grundlagen der Farbmessung

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. 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.

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

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



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 Farbzeptoren (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.

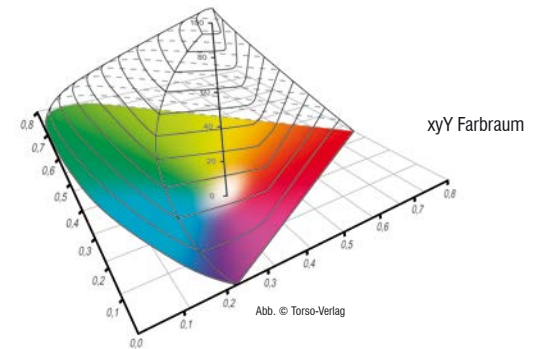
Y = die Helligkeit ist normiert von 0 bis 100

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.

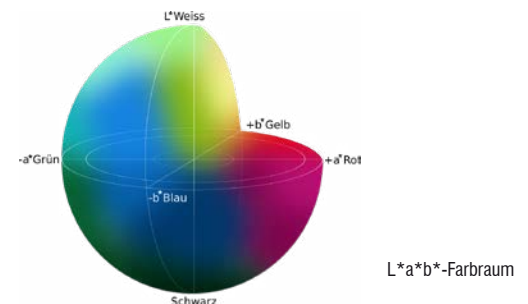
Der $L^*a^*b^*$ -Farbraum hat sich in der Industrie etabliert und wird von allen Geräteherstellern zur Farbprüfung verwendet.

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)



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.

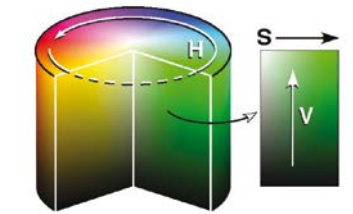
Jede Farbe ist durch den Farbort (H; S; V) definiert.

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)

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

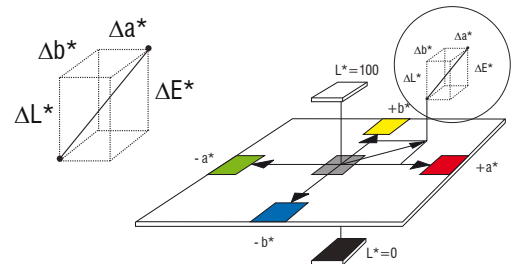
Interpretation:

- $\Delta E > 5$ 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

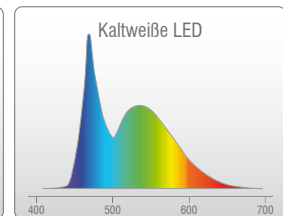
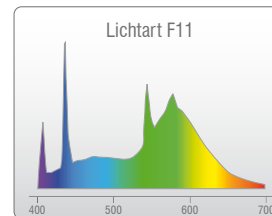
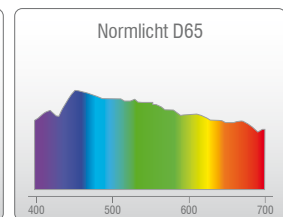
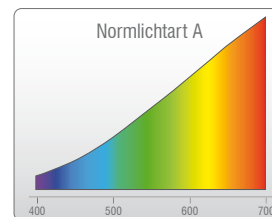
Normlichtarten sind von 380 bis 780 nm festgelegt

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



Probe (p)

Vergleich (v)



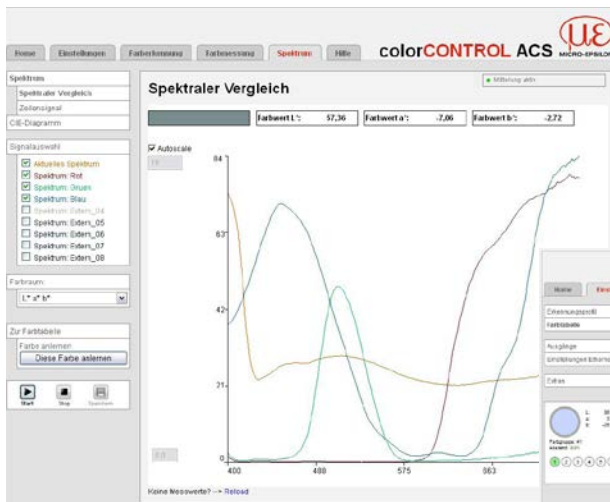
Webinterface zur intuitiven Bedienung

Die gesamte Konfiguration des der colorSENSOR und colorCONTROL Systeme erfolgt komfortabel und intuitiv über das integrierte Webinterface. Dazu wird der Sensor über die Ethernet-Schnittstelle mit einem PC verbunden. Das Webinterface ermöglicht die Messwertanzeige und das Einstellen von Parametern wie der Belichtung oder der Messfrequenz. Darüber hinaus lassen sich Anpassungen für Farbgruppen vornehmen und Toleranzräume für jede Farbe definieren.

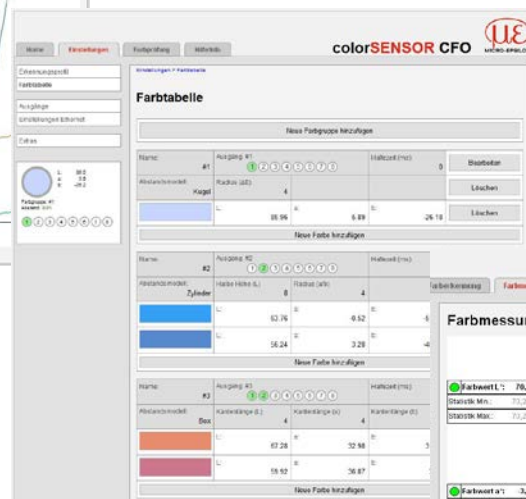


Ideal zur schnellen Messwertanzeige

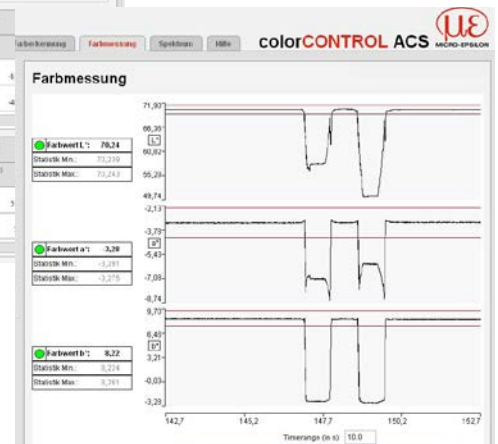
Die Weboberfläche ist z.B. für eine Labor oder Testanwendung von Vorteil, da Parameter schnell eingestellt und gelesen werden können. Zur schnellen Echtzeitüberwachung ist das Webinterface nur bedingt geeignet, da über die Messwertanzeige durch den Browser limitiert ist.



Spektrum und Farbt in der Bedienoberfläche



Konfiguration von Farbgruppen



Messwerte XYZ, L*a*b*, L*u*v*, L*C*h* über die Zeit dargestellt

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°c: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.

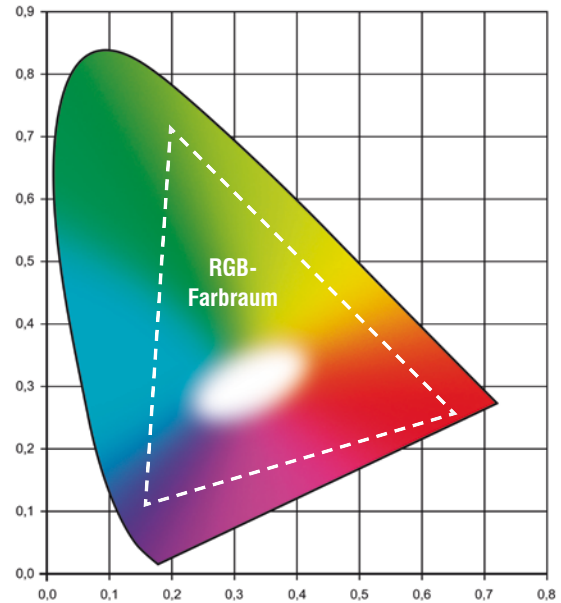


Abb. © Torso-Verlag





Änderungen vorbehalten / Y9760608-A032040MLO



MICRO-EPSILON Eltrotec GmbH
Manfred-Wörner-Straße 101 · 73037 Göppingen / Germany
Tel. +49 (0)7161 98872-300 · Fax+49 (0)7161 98872-303
eltrotec@micro-epsilon.de · www.micro-epsilon.de