

Untersuchungen zur farbmetrischen Genauigkeit von industriell eingesetzten Dreibereichsfarbsensoren

Ansgar Wego, Hochschule Wismar

ansgar.wego@hs-wismar.de

Gundolf Geske, ASTECH GmbH

geske@astech.de

Volker Ahrendt, ASTECH GmbH

Zusammenfassung

Zur Angabe von Farbmaßzahlen ist neben der Bezeichnung des verwendeten Farbraumsystems und der Messgeometrie auch die Bezeichnung der verwendeten Lichtart erforderlich. Die in der Automatisierungstechnik eingesetzten Dreibereichsfarbsensoren verwenden zur Objektbeleuchtung Weißlicht-LEDs. Weißlicht-LEDs zählen bislang nicht zu den normierten Lichtarten. Daher ist eine Vergleichbarkeit der Farbmaßzahlen mit spektralfotometrisch arbeitenden Farbmessgeräten i. A. nicht gegeben. Dies lässt jedoch noch keine Aussage über die erreichbare Genauigkeit dieser Geräteklasse zu. Bei Verwendung eines Weißlicht-LED-Spektrums als neue Lichtart mit der Bezeichnung „LED“ ist ein Vergleich beider Geräteklassen erlaubt. Die erreichbare farbmetrische Genauigkeit von Farbsensoren nach dem Dreibereichsverfahren kann auf diese Weise ermittelt werden. Nach einer linearen Korrektur der Messwerte, die mit einem Dreibereichsfarbsensor auf einer Testfarbtafel ermittelt wurden, konnte ein mittlerer Farbmessfehler von lediglich $\Delta E = 1,07$ in Bezug auf die spektralfotometrisch bestimmten Farbmaßzahlen erreicht werden.

1 Einführung

1.1 Motivation

Farbmessungen spielen heute bei der Sicherung der oberflächlichen Produktqualität eine wichtige Rolle. Viele Hersteller verschaffen ihren Produkten durch definierte Farbgebung einen hohen Wiedererkennungseffekt. Farben können durch Farbmaßzahlen beschrieben werden. Die technische Erfassung von Farbmaßzahlen mit hoher Genauigkeit erfolgt üblicherweise mit Farbmessgeräten auf spektralfotometrischer Basis. Diese sind für viele industrielle Automatisierungsprozess aber oftmals ungeeignet oder zu teuer. Eine Alternative bieten die Dreibereichsfarbsensoren, die konstruktiv und preislich besser den Anforderungen der Automation entsprechen. Allerdings gelten Farbsensoren als farbmetrisch ungenau, weswegen sie bei hohen Ansprüchen nicht zum Einsatz kommen [1]. Die Ursache für die vermeintliche Un-

genauigkeit der Farbmaßzahlen von Farbsensoren liegt aber hauptsächlich im Einsatz nicht genormter Weißlicht-LEDs als Lichtquelle, während Spektralfotometer genormte Lichtarten zur Farbmazahlberechnung verwenden. Ein Genauigkeitsvergleich ist daher streng genommen nicht möglich. Um dennoch eine Vergleichbarkeit herzustellen, müssen beide Gertety-
pen mit derselben Lichtart betrieben werden. Damit können die Grenzen der erreichbaren Ge-
nauigkeit von Farbsensoren objektiv bestimmt werden.

1.2 Farbmetrische Grundlagen

Unter Farbe wird eine Sinneswahrnehmung verstanden, die sich bei einem menschlichen Beobachter elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und 780 nm einstellt. Es handelt sich demnach nicht um eine physikalische Messgröße. Daher ist eine spezielle Metrik erforderlich, die auf Festlegungen basiert [2]. Die internationale Be-
leuchtungskommission (CIE) hat zu diesem Zweck 1931 die Normspektralwertfunktionen unter 2 Gesichtsfeldgren (2° und 10°) festgelegt, die zum Standard bei der farbmetrischen
Lichtbewertung geworden sind (siehe Abbildung 1).

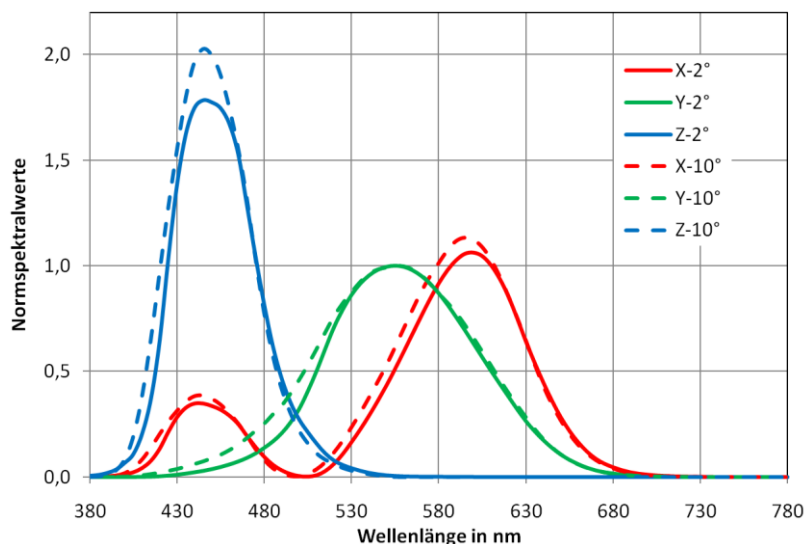


Abbildung 1: Normspektralwertfunktionen

Die Normfarbwerte X (Rotwert), Y (Grnwert) und Z (Blauwert) ergeben sich durch jeweilige Bewertung der Farbreizfunktion φ_λ mit den drei Normspektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ sowie $\bar{z}(\lambda)$ und anschließende Integration über den sichtbaren Spektralbereich entsprechend der Gleichungen (1) bis (3).

$$X = k \int_{380}^{780} \varphi_\lambda \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$Y = k \int_{380}^{780} \varphi_\lambda \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$Z = k \int_{380}^{780} \varphi_\lambda \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Neben der Festlegung der Normspektralwertkurven ist auch die Normierung der Strahlungsfunktionen der Beleuchtungsquellen erforderlich. Abbildung 2 zeigt die Strahlungsfunktionen von drei häufig verwendeten Lichtarten (Lichtarten A, D65 und Xe).

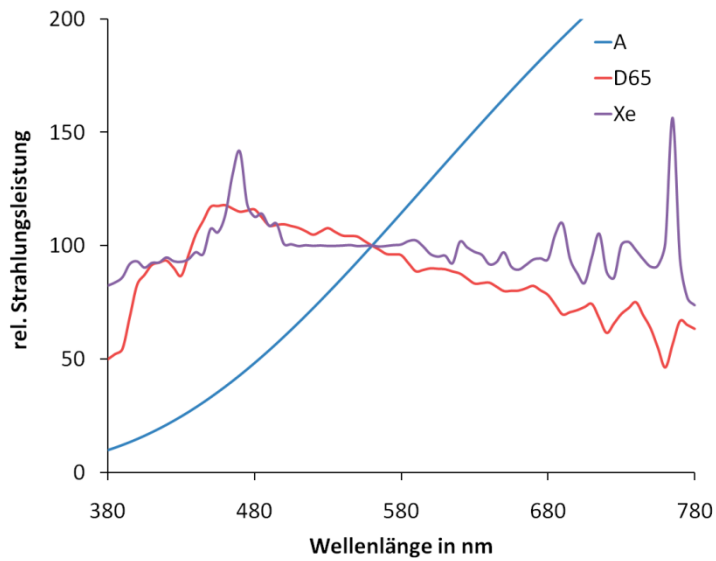


Abbildung 2: Strahlungsfunktionen normierter Lichtarten

Zur Darstellung von Farbörtern werden die Normfarbwertanteile entsprechend den Gleichungen (4) bis (6) gebildet.

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (4)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (5)$$

$$z = 1 - x - y \quad (6)$$

Damit wird eine 2-dimensionale Darstellung in der sogenannten Normfarbtafel möglich (Abbildung 3).

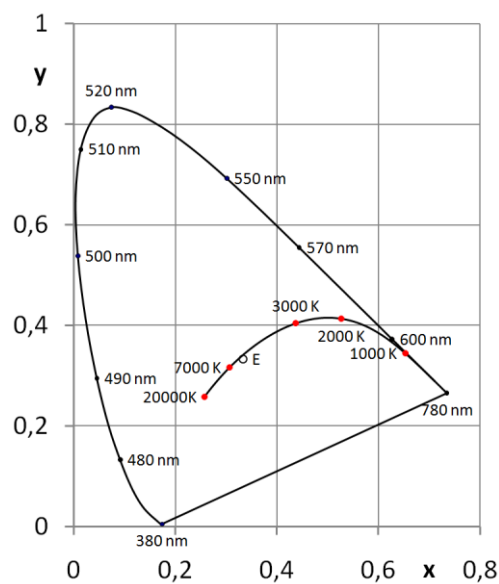


Abbildung 3: Normfarbtafel mit eingezeichnetem Spektralkurvenzug, Unbuntpunkt E (Weißpunkt) und Planckschem Kurvenzug

Die Normfarbtafel eignet sich allerdings nicht zur Bestimmung von perzeptiven (d. h. empfindungsgerechten) Farbabständen. Aus diesem Grunde hat die CIE 1976 sogenannte gleichabständige Farbenräume definiert, die durch eine Koordinatentransformation entsprechend den Gleichungen (7) bis (9) entstehen. In diesem Farbenraum kann der Farbunterschied (bzw. der Farbfehler) ΔE zwischen 2 Farben mit Hilfe des euklidischen Abstands nach Gleichung (10) ermittelt werden.

$$L^* = 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_N}} - 16 \quad (7)$$

$$a^* = 500 \left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_N}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_N}} \right) \quad (8)$$

$$b^* = 200 \left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_N}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_N}} \right) \quad (9)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (10)$$

1.3 Farbmessverfahren

Die Aspekte der Farbmessung sind in der DIN 5033 festgehalten. Zwei Verfahren sind dabei von technischer Relevanz – das *Dreibereichsverfahren* und das *Spektralverfahren*.

Beim Spektralverfahren wird das Licht in seine spektralen Anteile zerlegt und mit den Normspektralwertfunktionen bewertet. CCD-Zeilen oder Photodioden-Arrays dienen als Detektoren. Messgeräte nach dem Spektralverfahren arbeiten nach Aufnahme des Spektrums mit rein numerischer Datenverarbeitung. Daher können von diesen Geräten Farbmaßzahlen unter verschiedenen Lichtarten und Gesichtsfeldgrößen berechnet werden. Die Geräte erreichen verfahrensbedingt eine hohe absolute Messgenauigkeit, sind aber vergleichsweise langsam und teuer.

Beim Dreibereichsverfahren wird das Licht mit drei Filtern für den Rot-, Grün- und Blaubereich bewertet. Die Filter müssen dabei in ihrer spektralen Charakteristik den Normspektralwertfunktionen gleichen. Nach dem Dreibereichsverfahren werden oft Industriesensoren zur Farbdetektion ausgelegt, da das Verfahren kostengünstig und schnell ist. Die Genauigkeit ist durch die erreichbare Filterqualität begrenzt. Die Farbmesswerte sind untrennbar mit der verwendeten Beleuchtung verbunden.

2 Eigenschaften von industriellen Dreibereichsfarbsensoren

2.1 Aufbau von Farbsensoren

Aufgrund ihres dedizierten Einsatzgebietes in der industriellen Automatisierungstechnik zeichnen sich Dreibereichsfarbsensoren durch einen typischen Aufbau aus. Die Gehäuse erfüllen eine hohe Schutzart und sind zum festen Einbau in Maschinen geeignet. Die Versorgungsspannung ist auf typische 24 V ausgelegt. Um Wartungs- und Eingriffsfreiheit zu gewährleisten, werden Farbsensoren gegen Fremdlicht-, Temperatur- und Alterungseinflüsse

kompensiert [3]. Eine hohe Lebensdauer für die Geräte wird gefordert. Die Lebensdauer wurde früher durch die verwendete Lichtquelle begrenzt und betrug beim Einsatz von Temperaturstrahlern (z. B. Halogenlampen) nur wenige 1000 Stunden. Heute kommen zur Erreichung einer hohen Lebensdauer (>50.000 Stunden) ausschließlich Weißlicht-LEDs zum Einsatz. Das Spektrum von Weißlicht-LEDs hat hinsichtlich der Eignung zur Farbmessung zwar Nachteile, allerdings bieten LEDs den Vorteil einer schnellen Modulierbarkeit, was zur Fremdlichtkompensation genutzt wird [4].

2.2 Eigenschaften der eingesetzten Weißlicht-LEDs

Das weiß erscheinende Licht einer Weißlicht-LED entsteht durch Anregung eines Fluoreszenzstoffes (Abstrahlung im Gelbbereich) mit blauem Licht. Durch additive Mischung des blauen und gelben Lichtes entsteht weißes Licht. Ein gemessenes typisches Spektrum ist in Abbildung 4 zu sehen. Zu erkennen ist, dass im unteren (violetten) und oberen (roten) Wellenlängenbereich Spektralanteile fehlen, die für eine gute Farbbewertung notwendig sind.

Neben diesem Nachteil zeigen Weißlicht-LEDs Farbortverschiebungen, die durch unterschiedliche Flusstrome verursacht werden. Abbildung 5 zeigt die gemessenen Verschiebungen bei einer Variation im Bereich von 10% bis 100% des max. zulässigen Flusstroms. Zur Orientierung sind in der Abbildung der Plancksche Kurvenzug (rote Linie) inklusive Farbtemperaturangaben und der Unbuntpunkt (E) mit dargestellt.

Die Ursache für die Farbortverschiebungen liegt in der relativen Änderung der Spektralanteile im Spektrum der Weißlicht-LED. Bei hohen Flusstromen nehmen die Spektralanteile im Blaubereich der LED zu. In ähnlicher Weise ergeben sich auch Farbortverschiebungen durch Temperaturvariationen. Für die Verwendung einer Weißlicht-LED als Beleuchtungsquelle sind daher eine konstante Temperatur und ein konstanter Flusstrom zu fordern.

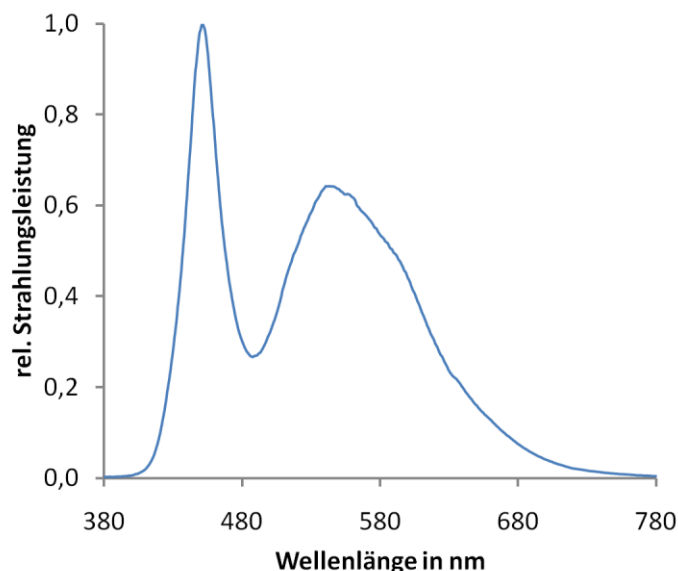


Abbildung 4: gemessenes Spektrum einer Weißlicht-LED

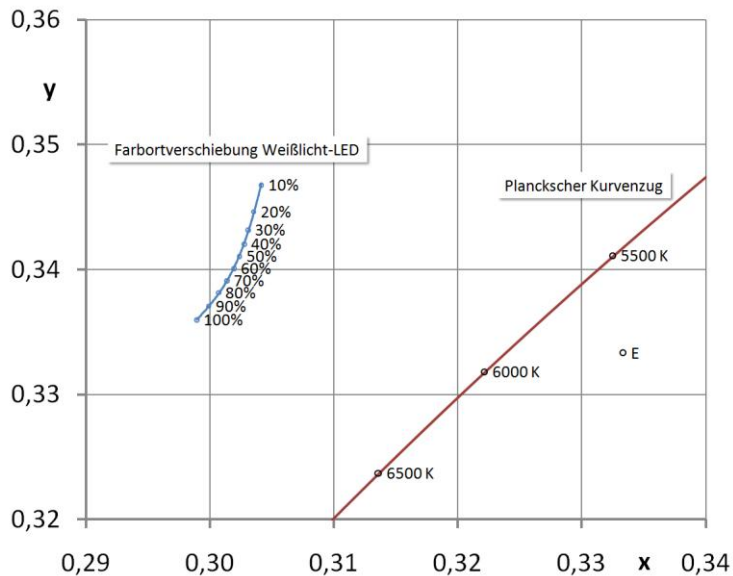


Abbildung 5: gemessene Farbortverschiebung einer Weißlicht-LED bei unterschiedlichen prozentualen Flusströmen

3 Experimentelle Ergebnisse

3.1 Durchführung

Zur experimentellen Bestimmung der farbmetrischen Genauigkeit von Dreibereichsfarbsensoren stand ein CROMLAVIEW[®]-Sensor¹ zur Verfügung. Die Strahlungsfunktion der Lichtquelle dieses Farbsensors wurde als erstes ausgemessen und als neue Lichtart unter der Bezeichnung „LED“ zur weiteren Verwendung gespeichert. Ebenso wurden die zugehörigen Farbwerte für den vollkommen mattweißen Körper (Weißstandard) für die neue Lichtart „LED“ berechnet.

Für den Messwertvergleich wurde eine weitverbreitete Testfarbtafel mit 24 Farbfeldern verwendet (Typ ColorChecker[®]). Zunächst wurden die Reflexionsspektren der 24 Farbfelder dieser Testfarbtafel für den sichtbaren Wellenlängenbereich mit einer Ulbrichtkugel (Messgeometrie 8/d) in 0,32 nm Schritten vermessen. Aus den Reflexionsspektren wurden dann die Farbmaßzahlen im L*a*b*-Farbenraum bei den Lichtarten A, D65, Xe und „LED“ berechnet.

Anschließend wurden die 24 Farbfelder mit dem Farbsensor und derselben Ulbrichtkugel vermessen. Dazu wurde vorher lediglich ein Weißabgleich auf einem Spectralon[®] Weißstandard durchgeführt, wobei die zuvor berechneten Farbwerte des Weißstandards für die Lichtart „LED“ verwendet wurden.

3.2 Messergebnisse

Die Ergebnisse der Messungen zeigt Tabelle 1. Alle Angaben sind als Farbwertabweichungen (ΔE) in Bezug auf die spektralfotometrisch bestimmten L*a*b* Werte unter der Lichtart „LED“ angegeben. Spalte 2 enthält die Farbwertabweichungen des Dreibereichsfarbsensors. Im Vergleich dazu enthalten die Spalten 3 bis 5 die Farbwertabweichungen, wenn die Berechnung der L*a*b*-Werte unter Verwendung der Lichtarten A, D65 bzw. Xe erfolgt.

¹ Typ CR200, Hersteller: ASTECH Angewandte Sensortechnik GmbH, www.astech.de

Farbe	ΔE Farbsensor	ΔE mit Lichtart A	ΔE mit Lichtart D65	ΔE mit Lichtart Xe
dark skin	2,66	6,91	31,96	29,93
light skin	2,06	10,15	48,20	44,82
blue sky	2,56	6,79	36,73	35,56
foliage	2,17	3,64	24,29	22,20
blue flower	2,64	2,80	45,60	43,85
bluish green	4,09	15,86	32,01	30,15
orange	9,00	18,60	45,46	42,44
purplish blue	6,89	10,60	39,53	38,96
moderate red	5,99	24,10	55,29	52,68
purple	1,41	9,15	38,46	36,95
yellow green	3,53	13,38	26,91	22,72
orange yellow	8,51	12,89	43,86	40,00
blue	7,51	15,58	35,13	35,13
green	3,05	16,15	17,08	14,43
red	8,04	29,25	54,03	51,27
yellow	7,27	8,57	40,11	35,14
magenta	3,66	25,20	64,95	62,29
cyan	7,41	16,81	29,27	28,57
white 9.5	1,01	0,71	62,91	59,37
neutral 8	0,98	0,83	53,75	50,84
neutral 6.5	0,92	1,02	44,42	42,08
neutral 5	0,79	1,22	35,44	33,61
neutral 3.5	0,51	0,90	27,55	26,16
black 2	0,99	1,41	20,45	19,37
Mittelwert ΔE	3,90	10,52	39,72	37,44
Maximum ΔE	9,00	29,25	64,95	62,29

Tabelle 1: Gemessene Farbwertabweichungen (ΔE) zwischen Dreibereichsfarbsensor und Spektrometer (Spalte 2) und bezüglich verschiedener Lichtarten (Spalten 3-5)

3.3 Auswertung

Die Messergebnisse machen deutlich, dass bei Verwendung derselben Lichtart die Abweichungen der Farbmaßzahlen zwischen Dreibereichsfarbsensor und Spektralfotometer deutlich

geringer sind, als wenn Farbmaßzahlen unter Verwendung anderer Lichtarten als Bezugswerte für die Übereinstimmung der Farbmaßzahlen verwendet werden. Wendet man auf diese Ergebnisse eine lineare Korrekturmatrix entsprechend Gleichungen (11) und (12) an [5], dann sinkt der Fehler ΔE im Mittel auf 1,07 und im Maximum auf 2,34.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}}_{\underline{\underline{A}}} \cdot \begin{pmatrix} X_{Ist} \\ Y_{Ist} \\ Z_{Ist} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\underline{\underline{A}} = \underline{\underline{XYZ}}_{Soll} \cdot \underline{\underline{XYZ}}_{Ist}^T \cdot (\underline{\underline{XYZ}}_{Ist} \cdot \underline{\underline{XYZ}}_{Ist}^T)^{-1} \quad (12)$$

Berücksichtigt man, dass die Wahrnehmungsschwelle von Farbunterschieden beim Menschen bei etwa $\Delta E = 1$ liegt, dann lassen diese Ergebnisse demnach eine recht gute Übereinstimmung mit spektralfotometrisch Bestimmten Farbmaßzahlen erkennen.

Literatur

- [1] Ansgar Wego, Gundolf Geske und Volker Ahrendt: *Farbsensor versus Spektralfotometer*. messtec drives Automation, Ausgabe 7-8, 2011, S. 138-140.
- [2] Manfred Richter: *Einführung in die Farbmeterik*. Berlin, New York : de Gruyter, 1981
- [3] Ansgar Wego und Gundolf Geske: *Dem menschlichen Auge nahe*. MSR Magazin, Ausgabe 11, 2010, S. 38-40.
- [4] Ansgar Wego und Gundolf Geske: *Korrekte Erkennung von Farben und Oberflächen mit Farbsensoren*. Photonik, Ausgabe 5, 2010, S. 38-42.
- [5] Heiko Kempe und Dietmar Kollhoff: *Verfahren zur farbmeterischen Kalibrierung*. Proceedings 1. Workshop Farbbildverarbeitung, Hrsg. V. Rehrmann, Uni Koblenz, Tagungsband, 1995, S. 5-8