

Methode zur Verbesserung des Inter-Instrument-Agreements von Industriefarbsensoren

Gundolf Geske*, Ansgar Wego*

*Silicann Technologies GmbH · Joachim-Jungius-Str. 9 · 18059 Rostock · info@silicann.com

1. Einleitung

Eine wichtige Forderung an Industriesensoren ist Ihre gegenseitige Austauschbarkeit. In der Farbsensorik wird die Austauschbarkeit bisher durch erheblich schwankende Bauteilparametern erschwert. Insbesondere die häufig zur Objektbeleuchtung eingesetzten Weißlicht-LEDs aber auch die optischen Filter der Dreibereichsfotoempfänger unterliegen merklichen Herstellungsschwankungen. Die Folge ist, dass die gemessenen Farbwerte zwischen den Sensoren nicht vergleichbar sind und daher ein Austausch oft nicht möglich ist. Die Signalauswertung bei Farbsensoren ist 3-dimensional. Daher ist ein einfacher punktueller Abgleich – etwa mittels Potentiometer – nicht möglich. Die Farbinformation muss über den gesamten Farbraum 3-dimensional korrigiert werden.

Der Beitrag beschreibt eine wirksame numerische Korrekturmethode, die praktisch anwendbar und in kompakten Industriefarbsensoren auch umsetzbar ist.

2. Farbe und Fehler

Die Beurteilung, ob und wie stark eine Farbe abweicht ist zwar eine subjektive Empfindung. Diese kann jedoch im Lab-Farbraum (siehe Abbildung 1) quantifiziert werden. Der Lab-Farbraum enthält die Farbinformation in der ab Ebene und die Helligkeit in der L-Achse. Farbabweichungen werden als Vektoren mit 3 Dimensionen dargestellt, deren Beträge als so genannte ΔE -Werte (*delta error*) angegeben werden. Tabelle 1 gibt die Deutung dieser Farbabstände wieder.

Industrielle Farbsensorik benötigt oft kein absolutes Farbkoordinatensystem. Es reicht aus, wenn einmal „geteachte“ Farben wiedererkannt werden. Farbwertübertragungen z.B. in einem Multisensorsystem von einem Sensor zum anderen setzen jedoch voraus, daß alle Geräte recht gut übereinstimmen, um die Sensoren kostensparend und schnell auf Basis eines Mastergerätes einzuteachen.

Verhindern tun dies in erster Linie die Streuungen der Weißlicht LED, deren spektrale Kennlinie in Abbildung 2 dargestellt ist. Im Gegensatz zu anderen

Tabelle 1: Deutung von Farbabständen

Farbabweichung ΔE	Bewertung
<1	sehr kleine Farbabweichung, wird vom menschlichen Auge nicht wahrgenommen
1..2	kleine Farbabweichung, wird nur durch geschultes Auge wahrgenommen
2..3,5	mittlere Farbabweichung, wird durch nicht-geschultes Auge wahrgenommen
3,5..5	deutliche Farbabweichung
>5	starke Farbabweichung

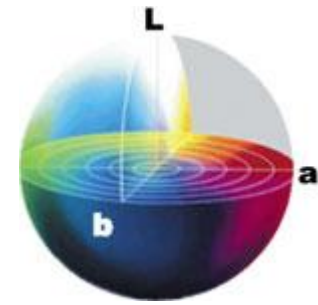


Abbildung 1: Darstellung des Lab Farbraumes, a: rot-grün-Achse; b: gelb-blau-Achse; L-Helligkeit

Kennlinien von Beleuchtungsmitteln ist das Spektrum recht zerklüftet. Die LED strahlt primär ein kurzwelliges blaues Licht (ca. 450 nm) ab, welches in der LED durch eine Lumineszenzkonverterschicht in langwelliges gelbes Licht gewandelt wird, das zudem auch recht breitbandig ist [3]. Die Mischung des blauen und gelben Lichts ergibt ein weißes Licht (Abbildung 1, b-Achse), welches jedoch herstellungsbedingt in seinem Farbton, aber auch in der Helligkeit schwankt. Diese Schwankungen werden von einigen Herstellern angegeben (Abbildung 4). Der Weißton kann so z.B. um die Strahlungskennlinie des schwarzen Strahlers herum liegen und einer erheblichen Streubreite der Farbtemperatur zwischen 4500K und 10000K entsprechen. Durch herstellerseitige Selektion der LEDs kann diese zwar stark eingeschränkt werden, was jedoch

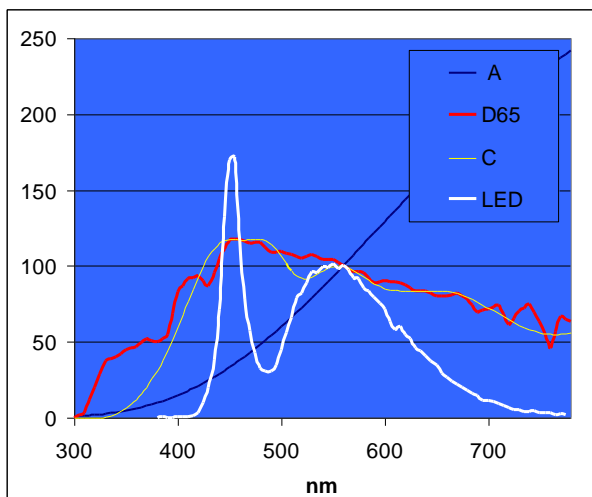


Abbildung 2: normierte spektrale Verteilung eine Glühbirne (A), der bekanntesten Normlichtarten D65 und C und einer Weißlicht LED

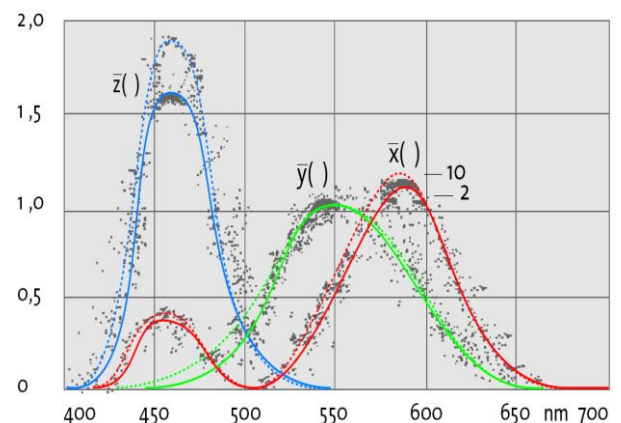


Abbildung 3: Normspektralwertfunktionen [1], die angenähert in einem Farbsensorprimärelement umgesetzt sind

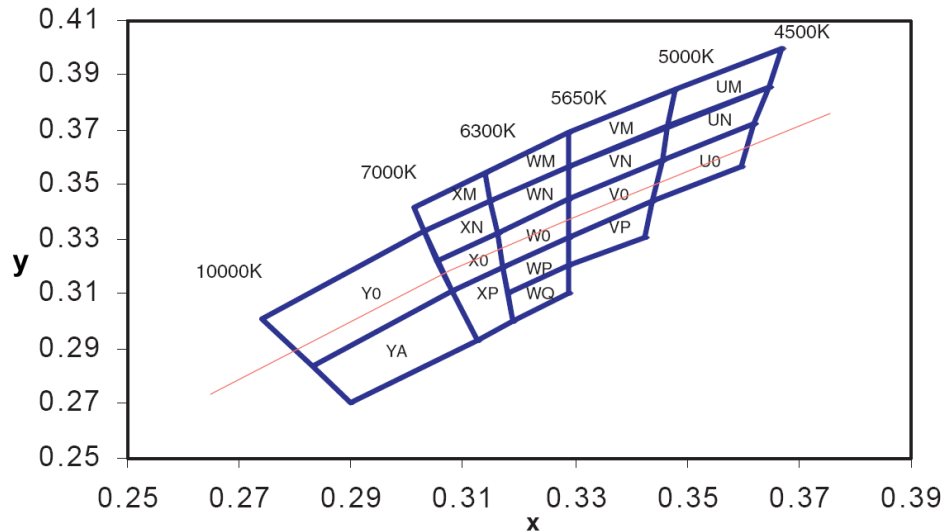


Abbildung 4: Kategorisierung der Streuungen von Weißlicht-LEDs [2]

trotzdem noch weit über dem Toleranzempfinden des menschlichen Auges liegt. Weitere herstellungsbedingte Schwankungen können sich in den Kennlinien des Farbsensorelementes befinden (Abbildung 3). Zwar werden Variationen der Dunkelströme der Fotodioden, welche auch temperaturabhängig sind, durch Chopperung der Beleuchtungsquelle und Differenzbildung im Sensor kanal vollständig eliminiert. Schwankungen in der Lichtempfindlichkeit – ob die Ursache im Halbleiter oder in den Farbfiltern zu finden ist – können jedoch nicht kompensiert werden. Parameterstreuungen in der weiterverarbeitenden Signalelektronik – Transimpedanzwandler, Verstärker und ADC – gehen ebenfalls in die Gesamtstreuung des Gerätes ein.

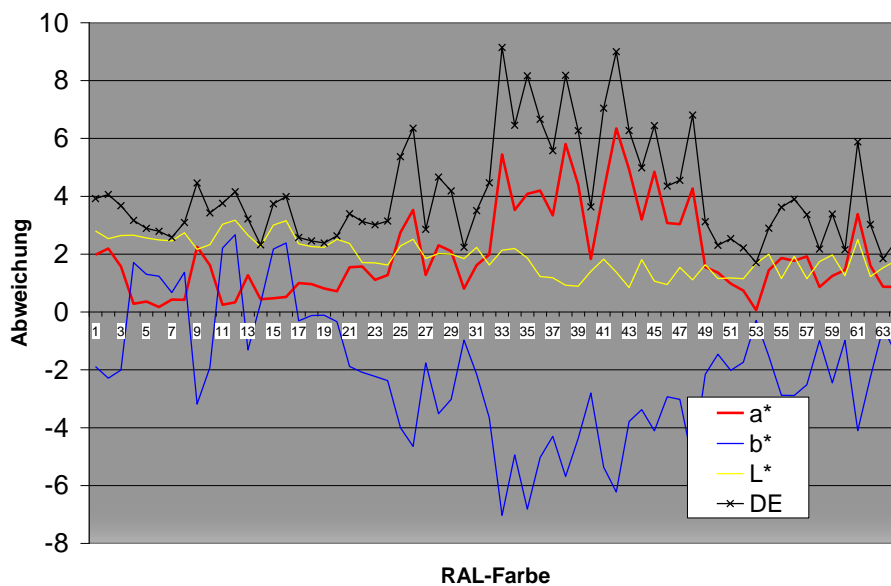


Abbildung 5: Darstellung der Abweichung zweier Farbsensoren im Lab-Farbraum anhand von einer Teilmenge von Farbwerten eines Farbfächers (RAL-Classic)

3. Farbabweichungen in der Untersuchung

Die Auswirkung der beschriebenen Streuungen auf die Farbwerte wurde ermittelt, indem Farbwerte für 64 ausgewählte Farben von RAL-Farbkarten mit zwei Sensoren aufgenommen und deren Farbabstände berechnet wurden (Abbildung 5). Bei einer mittleren Streuung von 4,09 und einem Maximum von 9,15 wird unter Berücksichtigung der Tabelle 1 klar, daß es sich um deutliche bis starke Farbabweichungen handelt, die für die meisten Anwendungen nicht akzeptabel wären.

4. Verbesserung des Inter-Instrument-Agreements durch Matrixkorrektur

Die Wirkung der im Sensor vorhandenen Streuungen kann durch eine targetbezogene Kalibrierung, bei der eine lineare Korrektur der Meßwerte durchgeführt wird, reduziert werden. Im Ergebnis sind die Farbabweichungen zwischen verschiedenen Sensoren so gering, daß sie vom menschlichen Auge praktisch so gut wie nicht mehr wahrnehmbar sind. Die Bestimmung der dafür nötigen KorrekturmatriX wird durch Vergleich der aktuellen Sensorrohwerte XYZ_{Ist} (siehe Abbildung 3) mit vorgegeben Sollwerten XYZ_{Soll} für ausgewählte Farbtargets, die geeignete Stützstellen im Farbraum repräsentieren, realisiert [4]. Dieses kann z.B. mit dem *GretagMachbeth™ ColorChecker* durchgeführt werden, der 24 Farbtargets umfaßt. Als XYZ-Sollwerte werden idealerweise Mittelwerte von einer großen Anzahl von Sensoren verwendet, um die Korrekturdifferenz statistisch gesehen für eine große Gruppe von Sensoren so gering wie möglich zu halten. Die Koeffizientenmatrix $\underline{\underline{A}}$ berechnet sich aus der Matrix der 24 Sollfarben $\underline{\underline{XYZ}}_{Soll}$ und der Matrix der 24 aufgenommenen Istfarben $\underline{\underline{XYZ}}_{Ist}$ nach folgender Gleichung:

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

Diese KorrekturmatriX muß für jeden Farbsensor berechnet und im Sensor gespeichert werden, was voraussetzt, daß jeder Sensor die Anzahl von 24 Farben aufnehmen muß. Ist die KorrekturmatriX im Sensor vorhanden, werden die Farbwerte folgendermaßen korrigiert:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_{Ist} \\ Y_{Ist} \\ Z_{Ist} \end{pmatrix}$$

Eine weitere Umrechnung in andere Farbräume, wie Lab oder Luv kann weiterhin erfolgen und zeigt auch dort, daß sich die Abweichungen deutlich reduzieren lassen.

5. Ergebnis

Die Wirksamkeit der Matrixkorrektur lässt sich durch Wiederholung der Farbwertaufnahme der oben genannten RAL-Classic-Farbkarten im Lab-Farbraum beweisen. Hier wurde jedoch der volle Farbumfang von 210 Farben benutzt. Abbildung 6 zeigt die Abweichung zwischen zwei Farbsensoren nach erfolgter Matrixkorrektur im Lab-Farbraum. Der maximale Fehler von über 9 ΔE -Einheiten konnte auf 2,64 verringert werden. Das Mittel der Abweichung liegt bei 0,9. Die meisten Abweichungen sind vom menschlichen Auge nicht wahr-

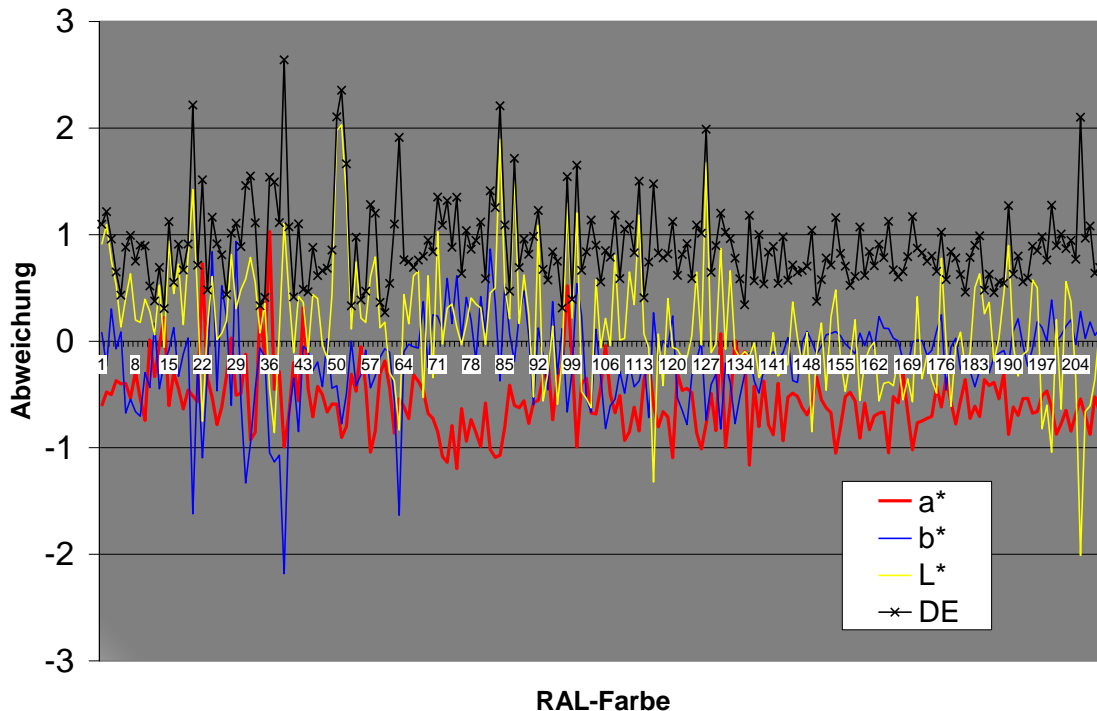


Abbildung 6: Darstellung der Farbabweichung zwischen zwei abgeglichenen Sensoren über alle 210 RAL-Farben des RAL-Classic-Farbfächers

nehmbar. Die maximalen Abweichungen liegen in einem Bereich, in dem ein normalsichtiges Auge diese gerade so wahrnehmen kann. Das Inter-Instrument-Agreement zwischen den Farbsensoren kann somit deutlich verbessert werden und eine Austauschbarkeit der Sensoren bzw. Übertragung von Farbwerten von einer Fertigungslinie auf weitere ermöglicht werden.

6. Literatur

- [1] CIE Norm 1931
- [2] Luxeon, (2006) Binning and Labeling. Seite 5.
- [3] Hans-Jürgen Warnecke, Hans-Jörg Bullinger (2003) Kunststück Innovation. Seite 202
- [4] MAZeT GmbH, (2003) Farbmessung mit den Farbsensoren MCS3 und MCSi.