

Bilder: HS Wismar

Spektralphotometrie auf LED-Basis

Genauigkeitsgrenzen bei der Anwendung für Körperfarbmessungen.

Spektralphotometer zur Messung von Reflexionsspektren sind oft teuer und erfordern hohe technologische Voraussetzungen. Ein alternatives Verfahren, bei dem verschiedenfarbige LEDs als Lichtquellen und eine Photodiode als Empfänger zum Einsatz kommen, bietet einen Preis- und Herstellungsvorteil.

Prof. Ansgar Wego, Gundolf Geske

■ Das optische Reflexionsspektrum eines Objektes wird in der Analytik oder der industriellen Automation häufig – wie ein Fingerabdruck – als eindeutiges Erkennungsmerkmal verwendet und zu dessen Charakterisierung beziehungsweise Identifikation herangezogen. Weiterhin werden aus dem Spektrum nach dem Spektralverfahren Farbmaßzahlen berechnet. Die Farbe eines Objektes ist die vom Menschen empfundene Erscheinung. Dabei ist der Mensch in seiner Wahrnehmungsfähigkeit auf einen Spektralbereich von 380 bis 780 nm beschränkt. Dieser Bereich wird als Licht bezeichnet. Farbmaßzahlen ermöglichen einen Vergleich der farblichen Erscheinung von Objekten. Sie sind somit ein geeignetes

Mittel in der Qualitätssicherung. Auch die Kommunikation von Farben erfolgt bei höheren Ansprüchen mittels Farbmaßzahlen. Die reinen sprachlichen Farbbeschreibungen – wie beispielsweise „Hellgrün“ oder „Dunkelrot“ – unterliegen der subjektiven Wahrnehmung und sind somit nicht geeignet, eine verbindliche Farbqualität zu definieren. Die Berechnung von Farbmaßzahlen im CIE-Normfarbsystem (Commission internationale de l'éclairage (Internationale Beleuchtungskommission)) erfolgt nach den Gleichungen (1) bis (3).

$$X = k \sum S(\lambda_i) \cdot \beta(\lambda_i) \cdot \bar{x}(\lambda_i) \Delta\lambda \quad (1)$$

$$Y = k \sum S(\lambda_i) \cdot \beta(\lambda_i) \cdot \bar{y}(\lambda_i) \Delta\lambda \quad (2)$$

$$Z = k \sum S(\lambda_i) \cdot \beta(\lambda_i) \cdot \bar{z}(\lambda_i) \Delta\lambda \quad (3)$$

Dabei stehen X, Y und Z für die Farben Rot, Grün und Blau. S beschreibt die Strahlungsfunktion der zugrundeliegenden Lichtart, β die Reflexionsfunktion des Objektes und x (beziehungsweise y und z) eine der drei Normspektralwertfunktionen.

Zur Messung des Reflexionsspektrums werden Spektralphotometer eingesetzt, da sie höchste spektrale Auflösung erreichen. Für eine Vielzahl einfacher Farbmessanwendungen ist eine hohe spektrale Auflösung aber unnötig. Als durchaus ausreichend wird ein Abtastintervall von 20 nm angesehen.

Prinzip des LED-basierten Spektralphotometers

Eine zum beschriebenen Verfahren alternative Methode für die Messung von Reflexionsspek-

tren besteht darin, das zu vermessende Objekt sequentiell mit schmalbandigen Lichtquellen verschiedener Wellenlänge zu beleuchten und das vom Messobjekt reflektierte Licht mit einem breitbandigen Photodetektor auszuwerten. Verwendet man als schmalbandige Lichtquellen einfache verschiedenfarbige LEDs und als Photodetektor eine herkömmliche PIN-Photodiode, dann ist eine preiswerte Realisierung eines solchen Spektralphotometers möglich. Idealerweise wäre für die spektrale Abtastung eine Lichtquelle mit Rechteckspektrum erforderlich. LEDs besitzen aber kein rechteckiges Spektrum. Daher sind die Reflexionswerte, die mit einem LED-basierten Spektralphotometer aufgenommen werden, prinzipiell fehlerbehaftet.

In Datenblättern wird zur spektralen Charakterisierung einer LED oft nur die Peak-Wellenlänge angegeben. Darüber hinaus sind aber noch die Halbwertsbreite, die Zentrumswellenlänge und die Schwerpunktwellenlänge wichtige spektrale Parameter. Farbmetrisch wird eine LED über den Farbort im CIE-xy-Farbdiaagramm beschrieben, aus der wiederum die sogenannte dominante Wellenlänge berechnet werden kann.

Für die erwähnte spektrale Auflösung von etwa 20 nm für ein Spektralphotometer im sichtbaren Wellenlängenbereich sind demnach beispielsweise 18 LEDs erforderlich. Bild 1 zeigt die gemessenen Spektren von 18 verschiedenfarbigen Standard-LEDs, die für das LED-basierte Spektralphotometer verwendet wurden. Die Auswahl der LEDs wurde anhand der in den Datenblättern angegebenen Peak-Wellenlänge getroffen. Die Spektren wurden im Diagramm so skaliert,

KONTAKT

Astech Angewandte Sensortechnik GmbH
Schonenfaherstr. 5
18057 Rostock
Tel.: +49 381 44073-0
Fax: +49 381 44073-20
E-Mail: info@astech.de
www.astech.de

Hochschule Wismar
Fakultät für Ingenieurwissenschaften
Postfach 12 10, 23952 Wismar
Tel.: +49 3841 753-0
Fax: +49 3841 753-7383
E-Mail: ansgar.wego@hs-wismar.de
www.et.hs-wismar.de

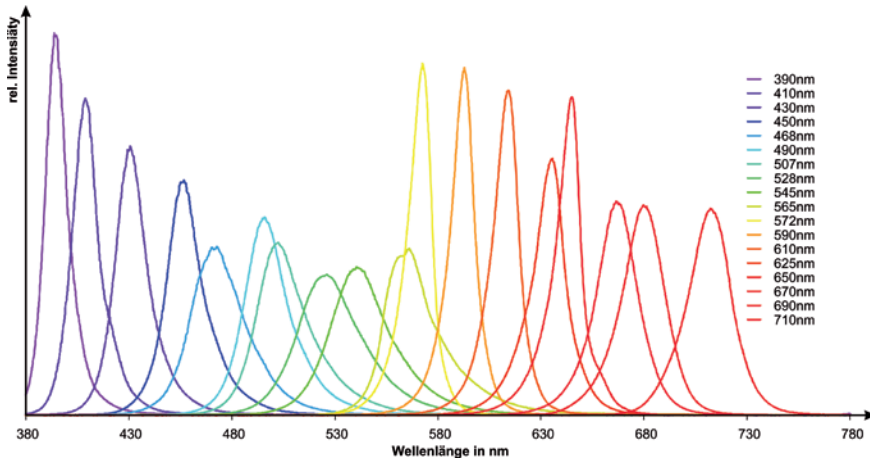


Bild 1: Spektren von 18 verschiedenfarbigen Standard LEDs bei gleicher integraler Leistung

dass eine gleiche integrale Leistung gegeben ist. Dadurch lassen sich die spektralen Eigenschaften der LEDs direkt vergleichen.

Die LEDs werden beim Vorgang der Reflexionsmessung zur Messobjektbeleuchtung sequentiell zugeschaltet. Der jeweilige Reflexionswert wird mit der Photodiode detektiert und in einem Mikrokontroller ausgewertet. Ein einzelner spektraler Abtastpunkt R_n ergibt sich mathematisch durch die Gleichung (4).

$$R_n = \sum_{\lambda=380nm}^{720nm} (S_{LED}(\lambda))_n \cdot \beta(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (4)$$

Jeder so erhaltene Abtastpunkt muss einer konkreten Wellenlänge zugeordnet werden. Da es hierfür mehrere Möglichkeiten gibt, wurde mit Simulationsrechnungen versucht das Optimum zu ermitteln. Als Grundlage für die Simulationen wurden die Reflexionsspektren der weitverbreiteten Farbtafel ColorChecker verwendet. Die Spektren für die 24 Farbfelder dieser Farbtafel liegen mit 10 nm Auflösung im Bereich von 380 bis 720 nm vor und sind über die Internetseitenbetreiber Babel Color frei erhältlich.

Zur Beurteilung der Farbmessgenauigkeit ist eine Auswertung in DE sinnvoll. Dazu ist eine Berechnung von Farbmaßzahlen im gleichabständigen $L^*a^*b^*$ -Farbraum nötig. Dieser entsteht durch Transformation der XYZ-Werte entsprechend der Gleichungen (5) bis (7). Die Farbabweichung DE kann dann als Abstand zweier Farborte entsprechend Gleichung (8) im $L^*a^*b^*$ -Farbraum berechnet werden.

$$L^* = 116 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_R}} - 16 \quad (5)$$

$$a^* = 500 \cdot \left[\sqrt[3]{\frac{X}{X_R}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_R}} \right] \quad (6)$$

$$b^* = 200 \cdot \left[\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_R}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_R}} \right] \quad (7)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (8)$$

Um die statistische Sicherheit für das Simulationsergebnis zu erhöhen, wurden die Farbmaßzahlen für jedes der 24 Farbfelder bei 11 verschiedenen Lichtarten (D50, D55, D65, D75, A, B, C, G, P, Xe, E) berechnet.

Ergebnisse

Eine Aussage über die Genauigkeit eines LED-basierten Spektralphotometers kann auf unterschiedlicher Vergleichsbasis getroffen werden. Werden 18 Abtastwerte – entsprechend der 18 verwendeten LEDs – aber mit idealen Rechteckspektren als Vergleichsbasis herangezogen, dann erhält man als Ergebnis aus den Simulationsrechnungen einen minimalen mittleren Farbmessfehler bei Zuordnung der spektralen Reflexionswerte zur Schwerpunktwellenlänge. Der Fehler betrug hier $DE = 2,61$. Wählt man die originalen Reflexionswerte von Babel Color mit 10 nm Auflösung als Vergleichsbasis (34 Abtastwerte), dann ergibt sich ein Fehler von $DE = 2,97$.

Allgemein gilt, dass eine Farbabweichung von $DE > 1$ für den Menschen sichtbar ist und daher ein Gerätefehler mit diesem Wert für Farbmessungen unakzeptabel ist. Es wird daher eine Fehlerminimierung der spektralen Reflexionswerte mittels linearer Korrekturmatrix durchgeführt. Für die Fehlerminimierung wird jetzt eine äquidistante Verteilung der 18 spektralen Abtastwerte (Intervall 20 nm,

Start bei 405 nm) unabhängig von den gegebenen LED-Parametern gewählt, da hierfür ein theoretisches Minimum von $DE = 0,14$ – bezogen auf die originalen Reflexionswerte von Babel Color mit 10 nm Auflösung – vorliegt. Die Korrekturmatrix A errechnet sich aus Soll- und Ist-Spektren für die Farbtafel nach Gleichung (9). Nach Anwendung von Gleichung (10) liegen korrigierte Reflexionswerte vor.

$$\underline{\underline{A}} = \underline{\underline{R}}_{Soll} \cdot \underline{\underline{R}}_{Ist}^T \cdot (\underline{\underline{R}}_{Ist} \cdot \underline{\underline{R}}_{Ist}^T)^{-1} \quad (9)$$

$$\underline{\underline{R}}_{korr.} = \underline{\underline{A}} \cdot \underline{\underline{R}}_{Ist} \quad (10)$$

Werden zur Matrixberechnung 8 der 24 Farben der Farbtafel (Blau, Grün, Rot, Gelb, Magenta, Cyan, Weiß und Schwarz) verwendet, wird ein deutlich reduzierter mittlerer Fehler von $DE = 0,65$ erreicht. Das Maximum tritt bei der Farbe Lila und Lichtart D75 auf und beträgt noch $DE = 5,21$. Werden zu den 8 gewählten Farben lediglich 2 weitere für die Matrixberechnung herangezogen (Orange und Lila), so sinkt der mittlere Fehler nun auf $DE = 0,24$. Der maximale Fehler liegt jetzt bei der Farbe Mittelrot und Lichtart C und beträgt $DE = 1,1$. Werden schließlich alle 24 Farben der Farbtafel zur Matrixberechnung mit einbezogen, so wird das theoretische Minimum von $DE = 0,14$ im Mittel erreicht. Die maximale Abweichung beträgt dann $DE = 0,66$ und tritt bei der Farbe Lila und der Lichtart Xe auf. (w/p) ■

Autoren

Ansgar Wego ist Professor für Allgemeine Elektrotechnik an der Hochschule Wismar. Gundolf Geske ist Leiter des Bereichs Farbsensorik bei der Astech Angewandte Sensortechnik GmbH in Rostock.

www.mechatronik.info

Diesen Artikel finden Sie im Internet, wenn Sie im Feld »Suche« die Dokumentennummer ME2116548 eingeben.



electronica 2012
inside tomorrow

Halle B4 / Stand 143



PTR
A Phoenix Mecano Company



Design-Steckverbinder

AK(Z) 4951

PTR Messtechnik GmbH & Co. KG · Gewerbehof 38 · 59368 Werne

www.ptr.eu

- ▶ Rastermaß 5.0 mm/5.08 mm
- ▶ zeitsparende Push-In-Technik
- ▶ mit Klingendrucker und Prüfabgriff
- ▶ in 2 bis 24-poligen Ausführungen erhältlich

Info: service@ptr.eu