LED-Lichtregelung mit genauer Farbmessung

Optimierung der Absolutgenauigkeit von True Color Farbsensoren zur Regelung von n-farbigen LED-Leuchten

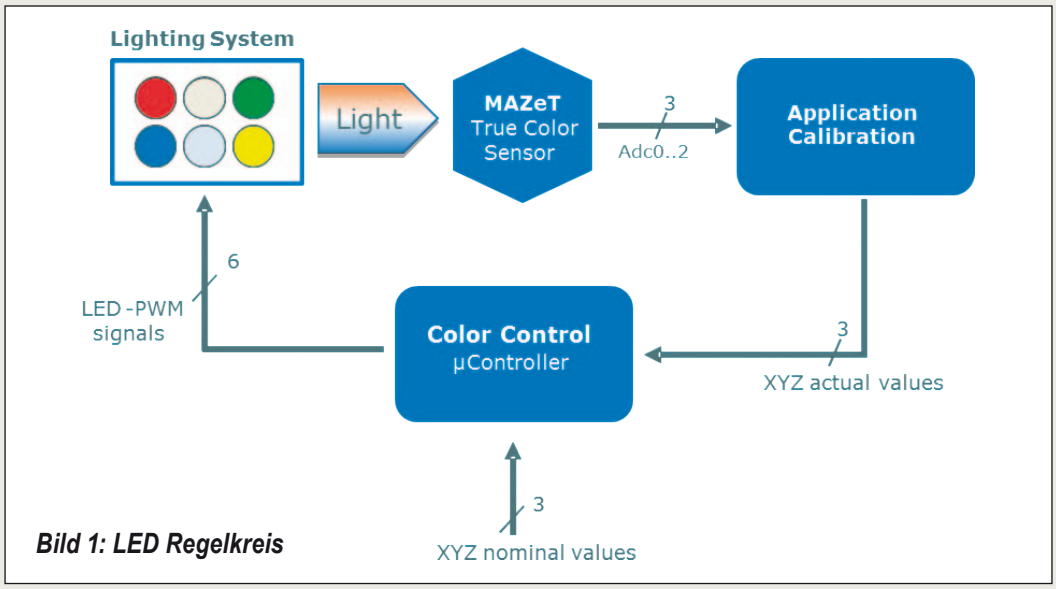

Bild 1: LED Regelkreis

Neben vielen Vorteilen haben LEDs auch diverse technische Nachteile. Um diese zu kompensieren (bsp. Temperatur- und Alterungsdrifterscheinungen) ist eine LED-Lichtregelung mit genauer Farbmessung erforderlich. Im Weißlichbereich kann mittels applikationsspezifischer Kalibration eine exakte Steuerung von beispielsweise 6500K, 4500K und 2700K ermöglicht und somit Negativeffekte von LEDs ausgeregelt werden.

Einleitung

Es ist bekannt, dass LEDs über die Temperatur einer Wellenlängenverschiebung und Intensitätsänderung unterliegen. Letztere wird zusätzlich durch Alterung verstärkt. In hochwertigen Anwendungen, wie medizinischen Leuchten, Maschinenleuchten oder Flugzeugbeleuchtung, ist aber eine stabile Lichtfarbe über die Lebensdauer einer LED-Leuchte für deren Einsatz Voraussetzung. Dies erfordert eine genaue Regelung des LED- Systems.

Um ein LED-System regeln zu können, wird eine präzise und schnelle Messung des aktuellen Farbortes vorausgesetzt. Für diese Zwecke ist die Verwendung eines True Color Farbsensors (TCS) notwendig. Entgegen eines Spektrometers liefert der TCS drei ADC-Werte, aus denen der Farbort ermittelt werden kann. Für die Regelung bedeutet dies, dass nicht das gesamte Spektrum vorliegt, sondern direkt von dem Farbort auf die LED-Belegung geschlossen werden muss. Somit ist es nötig bei einem LED-System mit mehr als drei verschiedenen LEDs von drei Eingabewerten (XYZ) auf mehr als drei Stellgrößen (für jede LED eine PWM-Belegung), zu schließen. In dem daraus resultierenden unterbestimmten System existieren somit für einen Farbort mehrere Belegungen. Die Eigenschaften des Lichtes je nach Belegung können sich stark unterscheiden, obwohl der resultierende Farbort derselbe ist. In der Praxis bedeutet dies, dass zwei LED-Leuchten zwar dieselbe Lichtfarbe haben, aber die beleuchtete Umgebung unterschiedlich wahrgenommen wird.

Langfristiges Ziel ist, für verschiedene LED-Regelsysteme bestehend aus n-farbigen LED-Leuchten (n >3), True Color Farbsensor und Regelalgorithmus, die genaue Farbortwiedergabe unter Berücksichtigung einer Nebenbedingung. Zum Beispiel ist der Farbwiedergabeindex eine mögliche Nebenbedingung. Das bedeutet,

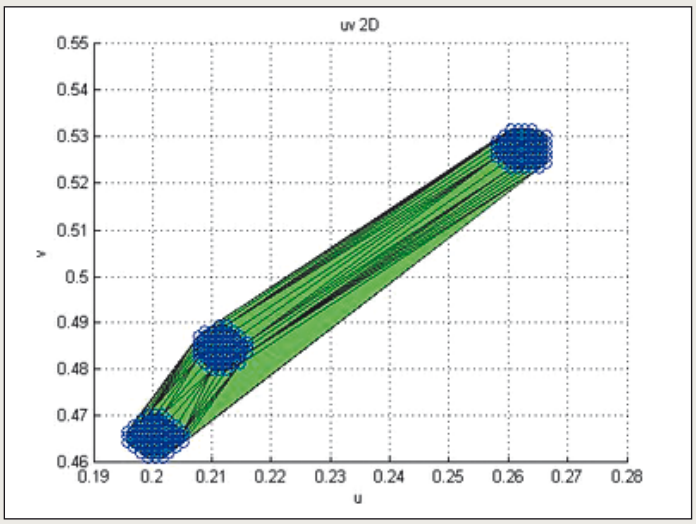

Bild 2: Farborte für 2700K, 4500K und 6500K

Autoren:

Dipl.-Ing. (FH) Fredrik Hailer,
Dipl.-Inf. Thomas Nimz

der Regelalgorithmus ist so optimiert, dass er die LED-Belegung eines Farbortes mit einem möglichst hohen Farbwiedergabeindex (CRI) verwendet.

Ziel der Kalibrierung ist die Optimierung der Absolutgenauigkeit des True Color Farbsensors. Um eine sehr gute Regelung zu ermöglichen, ist es notwendig, dass der Farbsensor in dem gewünschten zu regelnden Farbgamut eine Farbgenauigkeit von 0,003 Δu'v' erreicht.

Ziel dieser Untersuchung ist die Ausregelung der Farbtemperaturen 2700K, 4500K und 6500K mit maximaler Genauigkeit. Im Folgenden wird beschrieben, wie die benötigten Messreihen für die Optimierung erstellt werden. Anschließend wird die Optimierung der Kalibrierung und deren Ergebnisse vorgestellt.

Ermittlung der Farborte mit passender LED-Belegung

Es ist vorgesehen das LED-System auf 2700K, 4500K und 6500K zu optimieren. In einem ersten Schritt müssen in einem Radius von 0,005 um die drei Farbtemperaturen weitere Lu'v'-Farbkombinationen erzeugt werden, die später für die Optimierung der Kalibrierung benötigt werden. Wählt man die Schrittweite von 0,0012, so ergeben sich für jede Farbtemperatur etwa 110 Farbpunkte. Die Helligkeit wird dabei konstant gehalten. Bild 2 zeigt die Verteilung der Messpunkte.

Als Quelle für die notwendigen Messdaten dient ein Messplatz bestehend aus sechs verschiedenen LEDs, jeweils eine rote R, grüne G, blaue B, warmweiße wW, kaltweiße cW und amber A LED (kombiniert RGBwWcWA). Die LEDs werden unabhängig voneinander mittels einer PWM angesteuert. Der MAZeT True Color Farbsensor (MTCS) ist für die LED-Regelung vorgesehen. Für die Referenzmessungen wird das Spektrometer JETI Specbos 1211 verwendet. Zusätzlich wird eine Temperaturregelung zum Kühlen oder zum Beheizen der LED-Platine eingesetzt.

Um mit dem Messplatz real gemessene Werte für die 332 Farborte zu generieren, ist es notwendig die passenden LED-Belegungen zu berechnen. Als Grundlage für die Berechnung dienen die sechs LED-Spektren, gemessen bei 20 °C (siehe Bild 3) Mit dem folgenden Verfahren kann trotz des unterbestimmten Systems für jeden Farbort auf eine CRI-optimierte PWM-Belegung ermittelt werden.

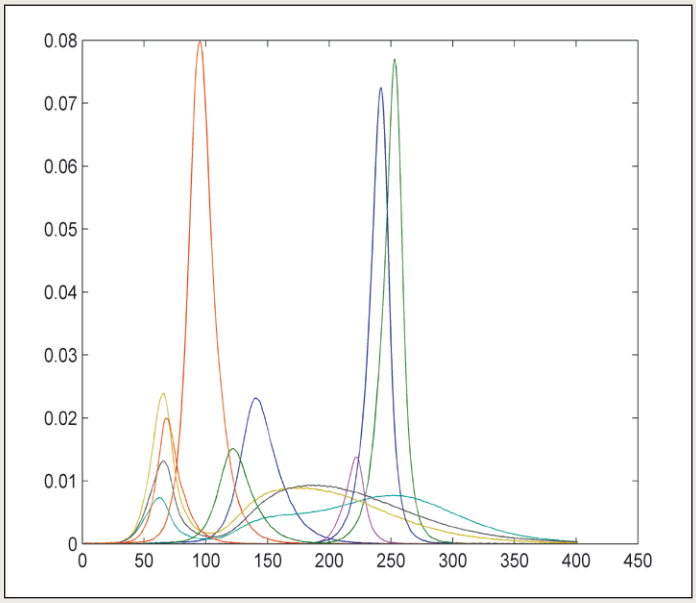

Bild 3: Spektren der LEDs des verwendeten Messplatzes

Schritt 1

Das unterbestimmte System wird auf mehrere bestimmte Systeme zurückgeführt, indem geprüft wird, welches Subgamut, bestehend aus jeweils drei LEDs, den vorgegeben Farbort beinhaltet. Anschließend wird für jedes betroffene Subgamut mittels einer linearen Transformation eine PWM- Belegung ermittelt.

Schritt 2

Optimierung. Ziel des Optimierungsverfahrens ist die verschiedenen PWM-Belegungen aus Schritt 1 so zu einer PWM-Belegung zusammenzusetzen, dass ein möglichst hoher Farbwiedergabeindex erreicht wird.

Schritt 3

Um die Ungenauigkeiten der zusammengesetzten PWM-Belegung, sowie deren Grenzen 0 und 255, zu bereinigen, wird anschließend noch ein Regelkreis simu-

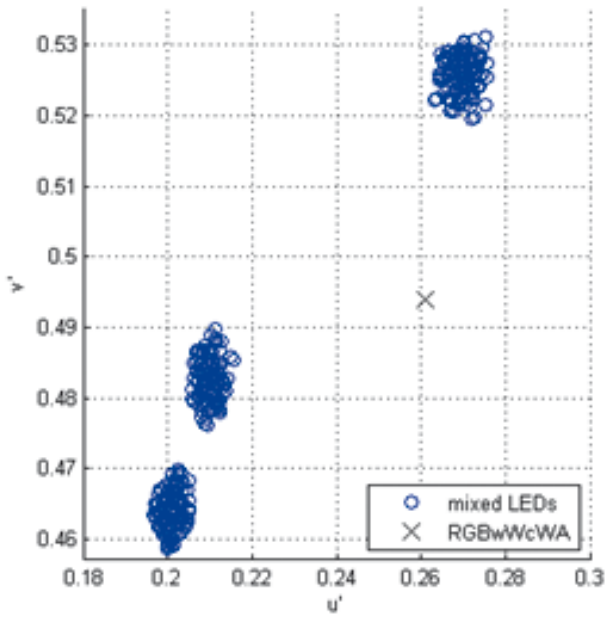

Bild 4: 20 Grad

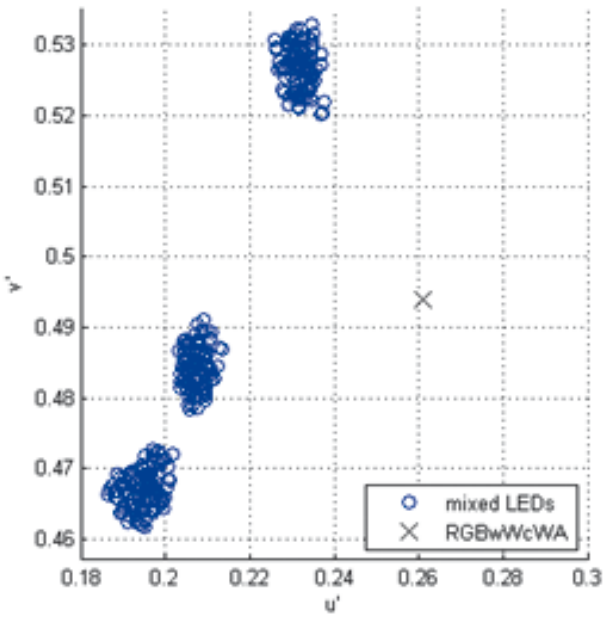

Bild 5: 80 Grad

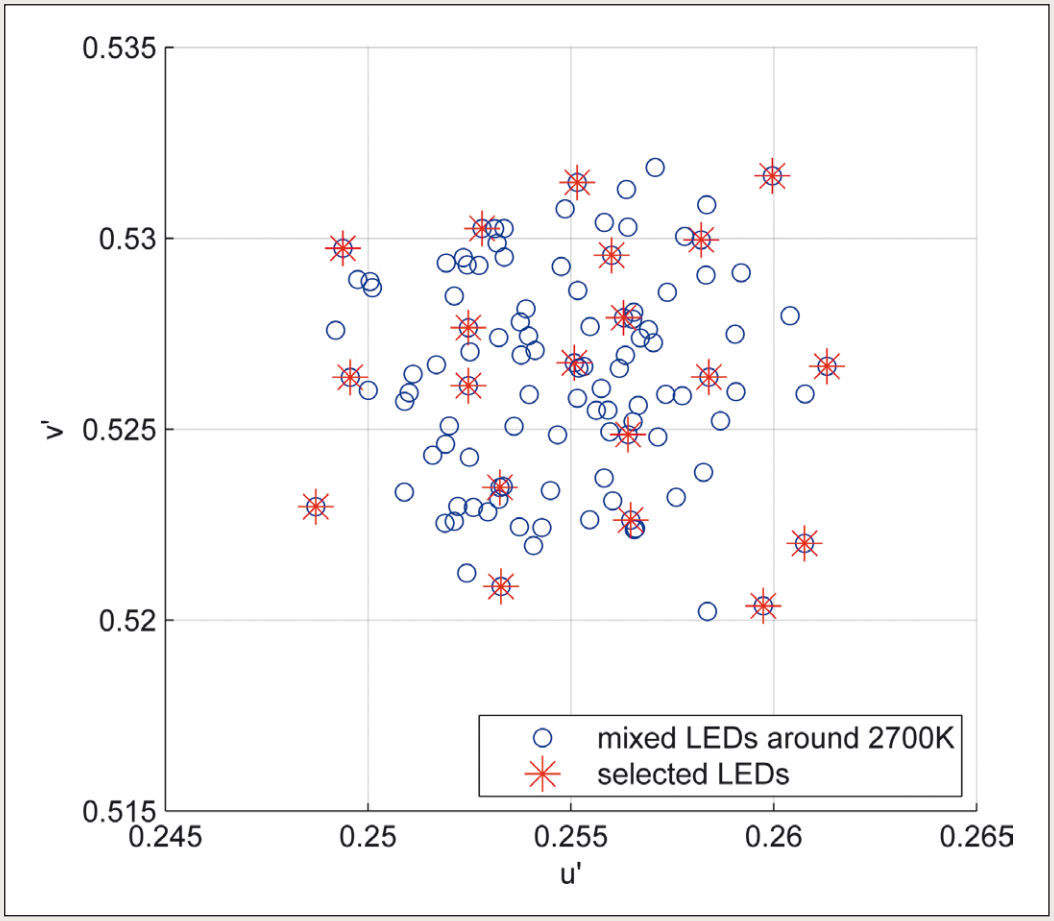

Bild 6: 20 ausgewählte Mischfarben um 2700K zur Optimierung

liert. Hierbei fließt die PWM-Belegung als Startbelegung ein und es wird mit drei ausgewählten LEDs nachgeregelt bis das Delta zum Zielfarbort kleiner 0,003 ist.

Messungen

Die in Abschnitt 2 ermittelten PWM-Belegungen dienen als Eingabe für den Messplatz. Ziel der Optimierung ist eine Kalibriermatrix für den TCS zu finden, die im Umkreis der drei Farbtemperaturen 2700K, 4500K und 6500K eine Farbgenauigkeit von 0,003 Δu'v' erreicht. Damit auch die temperaturbedingte Wellenlängenverschiebung und Intensitätsänderung von LEDs gemessen werden kann, werden die oben bestimmten PWM-Belegungen auch bei mehreren Temperaturen vermessen. Über die eingebaute Temperaturreglung ermöglicht der Messplatz Messungen zwischen 20 und 80 °C.

Die Ergebnisse der Messungen sind sieben Messreihen (20 - 80 °C in 10-°C-Schritten), bei der jeweils für jeden der 332 Farborte drei ADC-Werte des True Color Farbsensors und das Referenzspektrum gemessen mit einem Spektrometer vorliegen.

In Bild 4 und Bild 5 sind die Messwerte des Spektrometers bei 20 °C und 80 °C gegenübergestellt. Obwohl die vorgegebenen Farborte jeweils die gleichen sind, wird eine deutliche Farbortverschiebung sichtbar. Abhängig von der Betriebstemperatur und der LED-Belegung findet eine Farbortverschiebung von bis zu 0,038 Δu'v' statt. Um diese für das menschliche Auge sichtbare Farbortverschiebung durch eine aktive Regelung auszugleichen, ist es notwendig, dass der True Color Farbsensor in den Messbereichen eine hohe Absolutgenauigkeit erreicht (Δu'v' <0,003). Aus diesem Grund findet auf Grundlage der gemessenen Referenzspektren und der ADC-Werte des TCS eine optimierte Kalibrierung des Farbsensors statt. Im Folgenden wird das Optimierungsverfahren genauer vorgestellt.

Optimierung der Absolutgenauigkeit

Als Kalibriermethode wird eine polynomielle Regression 1. Grades mit Hilfe der Pseudoinversen nach Gleichung (1) verwendet. Die Werte θ_h (2) werden mit einem Referenzspektrometer und die Werte σ_h (3) mit einem True Color Sensor gemessen, wobei h der Anzahl an Kalibriertargets (Primärfarben) entspricht. Bei der vorliegenden Kombination RGBwWcWA ist h = 6. Die Primärfarben werden zeitgleich mit dem Referenzspektrometer und dem Dreibereichsensor bei einer PWM von 100% duty cycle gemessen. Es empfiehlt sich dabei die Kalibrierung bei einer mittleren Temperatur des gesamten Temperaturbereichs durchzuführen. Bei dem vorliegenden Messplatz ist die mittlere Temperatur 50 °C in einem Bereich von 20 °C bis 80 °C.

$$K = \left(\theta_h \cdot \sigma_h^T\right) \cdot \left(\sigma_h \cdot \sigma_h^T\right)^{-1} \qquad (1)$$

$$\theta_h = \begin{pmatrix} X_1 & \cdots & X_h \\ Y_1 & \cdots & Y_h \\ Z_1 & \cdots & Z_h \end{pmatrix} \qquad (2)$$

$$\sigma_h = \begin{pmatrix} \tilde{X}_1 & \cdots & \tilde{X}_h \\ \tilde{Y}_1 & \cdots & \tilde{Y}_h \\ \tilde{Z}_1 & \cdots & \tilde{Z}_h \end{pmatrix} \qquad (3)$$

Zur Optimierung der Kalibriermethode wird ein zusätzliches ß als Wichtungsfaktor für jede Primärfarbe hinzugefügt. Dieses ß wird mit dem Verfahren „simulierte Abkühlung“ (engl.: SA - Simulated Annealing) bestimmt.

Dieses Verfahren zur nichtlinearen Optimierung beruht auf einer stochastischen Suche nach dem globalen Minimum und auf der simulierten Abkühlung eines Materials. Bei hoher Temperatur unterliegen die Atome einer starken Bewegung und ordnen sich bei langsamer Abkühlung zu einer geordneten Kristallstruktur an, welche einen minimalen Energiezustand aufweist und somit am stabilsten für das Material ist. Ist die anfängliche Temperatur nicht hoch genug oder kühlt das Material zu schnell aus, ordnen sich die Atome in einem lokalen Minimum des Energiezustandes an. Es gilt somit eine geeignete Anfangstemperatur und Temperaturabnahme zu finden, um in endlicher Zeit mit hoher Wahrscheinlichkeit das globale Minimum zu finden [SA10].

Die simulierte Abkühlung ist auf die vorliegende Anwendung bezogen verwendbar. Dabei unterliegen die Wichtungsfaktoren ß einer zufälligen Bewegung zwischen 0 und 1, nach deren Kalibrierung das minimale Delta u'v' ermittelt wird. Mit zunehmender Anzahl an Iterationen verlangsamt sich die zufällige Bewegung und die Wichtungsfaktoren ordnen sich in einem lokalen Minimum an.

Zur Optimierung werden von den über 100 Mischfarben zwanzig selektiert, sodass diese mög-

		max Δu'v'		mitteleres Δu'v'	
	Temperatur	standard	optimiert	standard	optimiert
2700K	20°C	0,0083	0,0057	0,0050	0,0029
	50°C	0,0067	0,0035	0,0039	0,0018
	80°C	0,0070	0,0056	0,0037	0,0034
4500K	20°C	0,0029	0,0017	0,0020	0,0011
	50°C	0,0030	0,0012	0,0019	0,0008
	80°C	0,0035	0,0020	0,0020	0,0006
6500K	20°C	0,0020	0,0017	0,0011	0,0009
	50°C	0,0017	0,0016	0,0008	0,0006
	80°C	0,0020	0,0021	0,0007	0,0005

lichst gleichverteilt um die jeweilige Farbtemperatur liegen. Bild 6 zeigt diese Selektion für die Farbtemperatur 2700K. Von diesen 20 Mischfarben wird nun der maximale Fehler Δu'v' mittels Simulated Annealing minimiert.

Als Prüfung, ob die Optimierung erfolgreich ist, wird die optimierte Kalibrierung auf alle 110 Mischfarben angewandt. Darunter sind also etwa 90 Mischfarben, die während der Optimierung nicht verwendet wurden. Das Ergebnis mit und ohne Optimierung zeigt Tabelle 1. Bei 2700K konnte der maximale Fehler von Δu'v' = 0,0083 auf 0,0057 minimiert werden. Die mittleren Fehler liegen nun unter 0,0034 anstatt bei 0,005. Bei den Farbtemperaturen 4500K und 6500K konnte der maximale Fehler von 0,0035 auf 0,0021 optimiert werden. Im Mittel liegen sie deutlich unter 0,0011.

Zusammenfasung

Für die Anforderungen einer hochwertigen LED-Leuchte mit stabiler Lichtfarbe über die komplette Lebensdauer ist gezeigt, dass die Messung mit einem True Color Sensor hinreichend genau ist, um eine nachfolgende Regelung zu ermöglichen.

Mittels der Optimierung kann die Messgenauigkeit des True Color Sensors für neutral- (4500K) und kaltweiß (6500K) auf Δu'v' < 0,0021 verbessert werden. Bei warmweißen Licht (2700K) wird aufgrund des hohen Einflusses der amber und der roten LED, welche einen sehr hohen Temperaturdrift haben, ein maximales Δu'v' von 0,0057 erreicht. Für diesen Farbbereich ist es notwendig die Optimierung auf die Eigenschaften der LEDs weiter anzupassen.

Mit dem entwickelten Messplatz und der Optimierung sind die Grundlagen für die Umsetzung von LED-Regelungen mit vier oder mehr LEDs vorhanden. Es ist geplant die Optimierung weiter zu verbessern und die Entwicklung der Regelalgorithmen voranzutreiben. Ein Ansatz für eine LED-Regelung ist der in Absatz 2.1 vorgestellte Ablauf zur Ermittlung der PWM- Belegung. Weiterhin ermöglicht der aufgebaute Messplatz eine schnelle Umrüstung auf kundenspezifische LED-Systeme. Dies erlaubt eine kostengünstige Validierung weiterer LED-Systeme bestehend aus MTCS und vier oder mehr verschiedene LEDs. Gesamtziel sind LED-Regelsysteme mit einer Absolutgenauigkeit von maximal Δu'v' = 0,003 und einen CRI über 90 auf der plankschen Weißkurve.

Dank

Die Autoren möchten sich bei Prof. Dr.-Ing. Joachim Denzler, Prof. Dr. Walter Alt (beide Friedrich-Schiller-Universität Jena) sowie von Prof. Dr.-Ing Mladen Berekovic (Technische Universität Braunschweig) für die hilfreiche Unterstützung bedanken.

Literaturhinweise

(1) MAZeT-Webseite: http://www.mazet.de

(2) Produktinformationen zu Farbsensoren: http://www.mazet.de/en/products/jencolor

(3) Application note, Calibration of JENCOLOR sensors based on the example of LED light sources, MAZeT GmbH, 2012

(4) F.Hailer, F. Krumbein, Application of JENCOLOR multispectral sensors in dermatology, Ilmenau University of Technology (Thur.), 2011, urn:nbn:de:gbv:ilm1-2011imeko- 083:6

(5) Walter Alt, Nichtlineare Optimierung, Vieweg+Teubner, 2002, 978-3528031930

(6) WWW.EBERL.NET. Simulated Annealing, 12:14 Uhr 14.02.2010. URL: http://www.eberl.net/chaos/Eberl/node50.html

▶ *MAZeT GmbH Vertrieb*
sales@mazet.de
www.mazet.de