Regelung von RGB LEDs in Lichtquellen und Backlights

Gunter Sieß
MAZeT GmbH
07745 Jena
gunter.siess@mazet.de
www.mazet.de

1 Einleitung

Der Einsatz von LEDs in der Display- und Beleuchtungstechnik nimmt in rasantem Tempo zu. Dies wird nicht nur in der kleineren Bauform, sondern maßgeblich auch durch die höhere Lebensdauer, geringerem Stromverbrauch, höhere Lichtleistung und größerem Farbgamut bestimmt.

Durch die Kombination von RGB-LEDs in einer Lichtquelle kann jede beliebige Farbe eingestellt werden, die innerhalb des Gamuts, begrenzt durch die Eckpunkte der Einzel-LEDs, definiert ist. So lassen sich in der Beleuchtungstechnik gezielt Tageslicht- oder persönliche Lichtstimmungen und andere visuelle Effekte durch Steuerungen und Regelungen nachbilden. In der Displaytechnologie sowie in der Beleuchtungstechnik erhält man durch die Verwendung RGB-LED basierenden Backlights eine verbesserte Farbbrillanz durch die Aufweitung des verfügbaren Gamuts. Somit können sehr gesättigte Farben erzeugt werden.

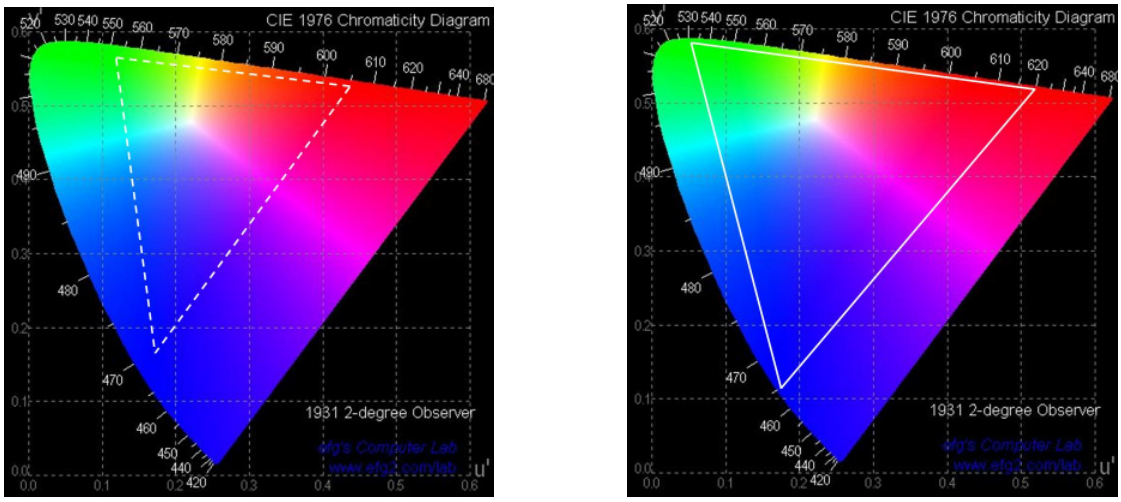


Abbildung 1; Lu'v'-Farbraum mit CRT-Monitor-Gamut (l) und RGB-LED-Gamut (r)

Das emittierte Spektrum einer LED ist dabei von mehreren Faktoren abhängig. Besonders durch variierende Betriebstemperaturen, Diodenströme und die Lebensdauer sind Änderungen, zum Teil recht erheblich, sowohl der abgegebenen Leistung als auch der spektralen Lage zu beobachten.

Ziel der Geräteentwicklung und Forderung der Anwender ist die Umsetzung von Lampen, Leuchten oder Backlights mit gleichem und konstantem Farbeindruck bzw. Farbdifferenzen, die durch die menschliche Wahrnehmung nicht unterschieden werden. Diese

Forderung ist umso wichtiger, sobald zum Beispiel mehrere z.B. LED-basierende Lichtquellen oder Hybridleuchten nebeneinander angeordnet sind und eine Vergleichbarkeit direkt für das menschliche Auge gegeben ist. Sichtbare farbliche Unterschiede würden hier die Produktqualität und das Marktpotential extrem herabsetzen.

Die Gewährleistung gleicher Farbeindrücke macht eine aktive Regelung des Farbortes durch gezielte Mischung der (LED)-Farbanteile unumgänglich. Notwendig hierfür sind einfache, preiswerte und langzeit- und temperaturstabile Sensoren, die eine Information über den eingestellten Farbort der LED-Quelle liefern. Mit deren Information kann dann in den meisten Fällen über Pulsweitenmodulation (PWM) oder Stromstärke die Helligkeit der einzelnen LED-Farben und der somit erzielten Mischfarbe auf einen Sollfarbort nachgeregelt werden.

Am Markt werden für derartige Mess- und Regelaufgaben verschiedene Farbsensor-ICs angeboten. Der folgende Artikel charakterisiert die Eignung bei der Verwendung einfacher RGB-Farbsensoren zur Farbregelung und begründet die Notwendigkeit optimierter spektraler Sensorempfindlichkeiten die an die Normspektralwertfunktion angenähert sind und die erzielbaren Regelgenauigkeiten.

2 Eigenschaften von LEDs

Für Backlights und Beleuchtungszwecke werden die bestehenden auf Leuchtstoffröhren- und Weißlicht-LED-basierenden Systeme zunehmend durch RGB-LEDs ergänzt oder gar vollständig abgelöst. Die Auswahl der verwendeten LEDs richtet sich dabei nach dem gewünschten Farbumfang (Gamut), der zur Verfügung stehen soll. Die folgenden Betrachtungen gehen von RGB-LEDs mit einer typischen Peakwellenlänge von λ_{PRed}=630nm, λ_{PGreen}=520nm und λ_{PBlue}=460nm aus. Diese Wellenlängen sind charakteristisch für z.B. Projektionsaufgaben und Backlightanwendungen. Die Farborte der LED und der somit aufgespannte Gamut für ca. 30°C und 350mA sind in der Abbildung 1 gezeigt.

In der Praxis sorgen vor allem Temperaturänderungen zu nicht vernachlässigbaren Farbortänderungen der Voll- und Mischfarben. Neben der rapide abnehmenden Strahlungsintensität bei zunehmender Diodentemperatur lassen sich auch zusätzlich Drifte der Spektren hin zum Langwelligen beobachten. Diese Wellenlängendrifts und die Auswirkung der Farbortänderungen für die Vollfarben zeigen Abbildung 2 und Abbildung 3.

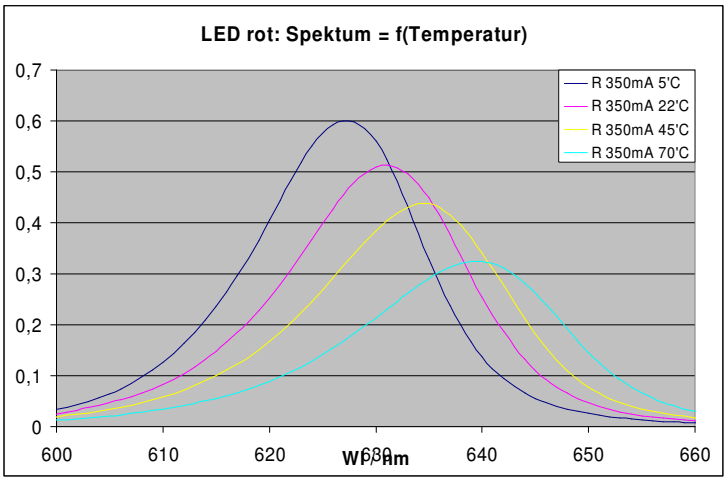


Abbildung 2; Änderung der Emissionsspektren als Funktion der Temperatur (LED_{red})

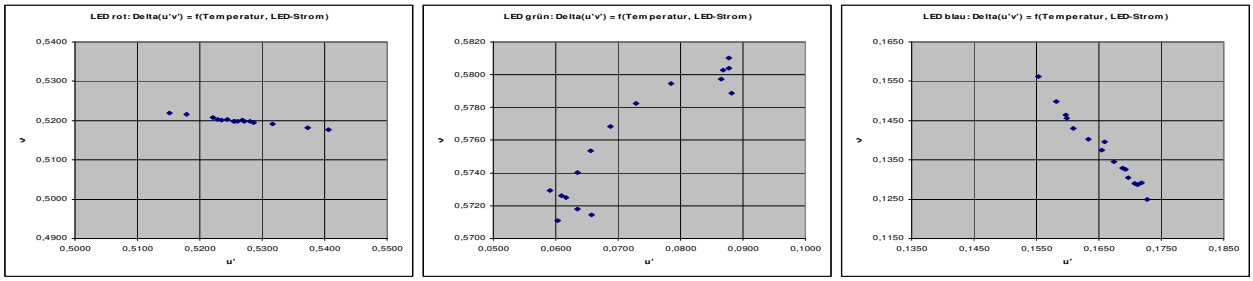


Abbildung 3; u'v'-Farbortänderung durch Temperatur (1°C…70°C) und Diodenströme (50mA….400mA)

Die beobachteten Wellenlängendrifts lagen für die Rot- und Grün-LEDs bei +/-7nm und für die Blau-LED bei +-3nm. Die somit verursachten Farbortstreuungen Δu'v' erreichten für die Rot-LED 0,025, für die Grün-LED 0,031 und für die Blau-LED 0,036. Die mit den meisten Geräten anvisierte Farbkonstanz von Δu'v'<0,005 wird somit deutlich überschritten. Gleichzeitig wird auch der reproduzierbar darstellbare Gamut eingeschränkt. Abbildung 4 zeigt, dass bei Nutzung des Arbeitsbereiches durch Farbmischung lediglich die Farben reproduzierbar erzeugt werden können, die innerhalb des Gamuts (gestrichelte Darstellung in Abbildung 3) definiert sind.

Voraussetzung für die erfolgreiche Farbreproduktion ist die Kenntnis über die existierenden Farborte der Eckpunkte des Gamuts bzw. der Farborte der erzeugten Mischfarbe, zum Beispiel des Weißpunktes, und der entsprechenden Nachregelung der Mischungsverhältnisse.

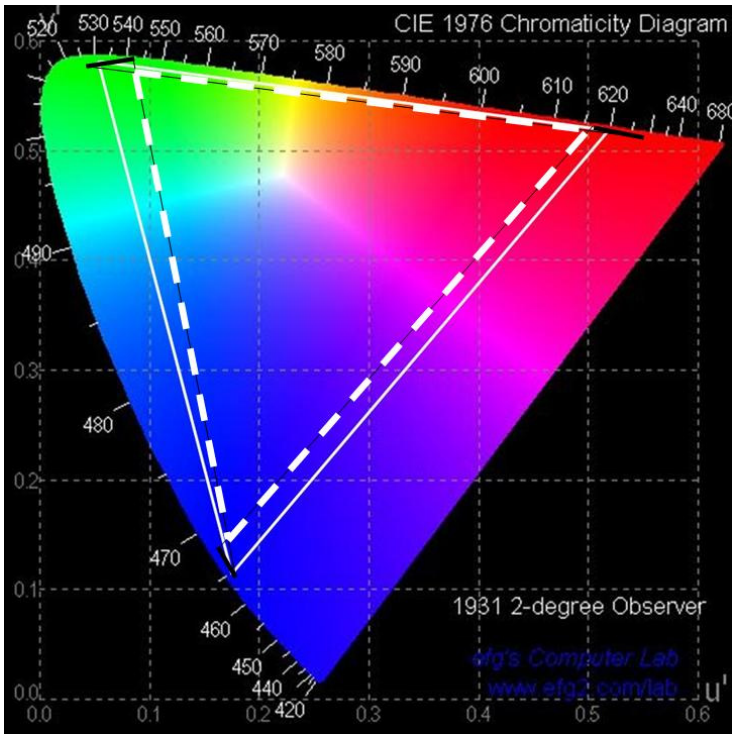


Abbildung 4; eingeschränkter RGB-LED-Gamut unter veränderlichen Emisionsspektren

3 Farbortmessung mittels Dreibereichssensoren

In der Praxis wird die Farbortmessung durch den Einsatz von Farbsensoren realisiert. Am Markt stehen hierfür verschiedene Dreibereichsfarbsensoren zur Verfügung, die sich jedoch in ihrer spektralen Empfindlichkeit der RGB-Detektorkanäle unterscheiden. Die exakte Messung auch über ein Spektrometer bezieht sich auf die Normspektralwertfunktion, wie sie in der DIN5033 festgelegt ist (Abbildung 5). Die Normspektralwertanteile XYZ nach CIE1931, die Grundlage für die Transformation in jeden beliebigen anderen Farbraum sind, ergibt sich dabei aus den Integralen aus Spektralwertfunktionen und der Strahlungsfunktion der LED-Quelle:

$$X = k \cdot \int_{380nm}^{780nm} \bar{x}(\lambda) \cdot \phi(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \cdot \int_{380nm}^{780nm} y(\lambda) \cdot \phi(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \cdot \int_{380nm}^{780nm} \bar{z}(\lambda) \cdot \phi(\lambda) d\lambda$$

Formel 1; Berechnung der Normfarbwertanteile

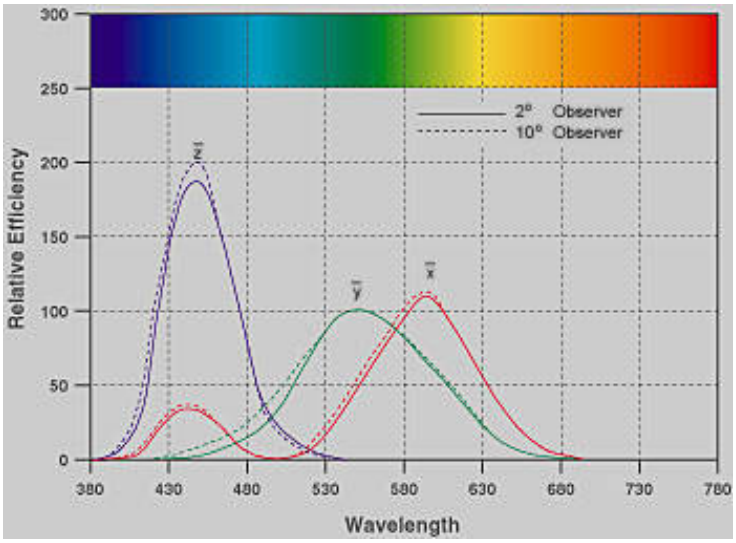
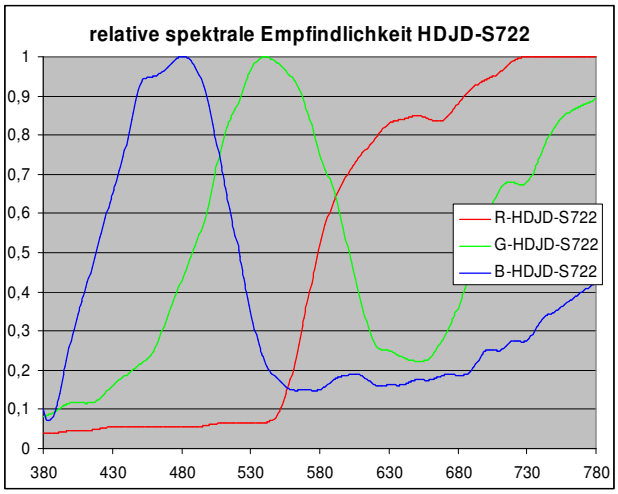


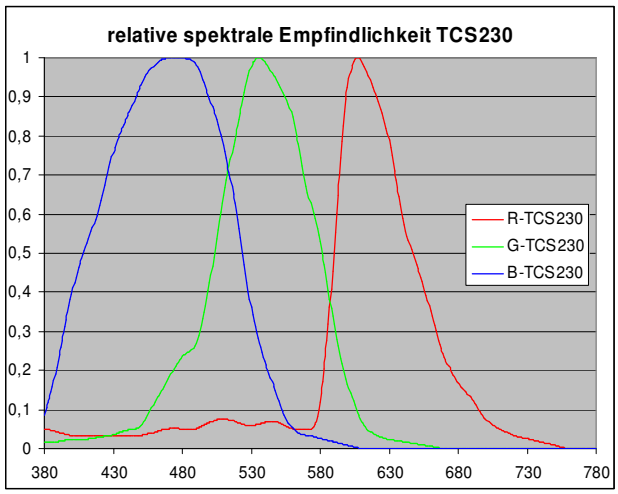
Abbildung 5; Normspektralwertfunktionen

Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung für die Arbeit mit Dreibereichssensoren, dass eine möglichst gute Annäherung an die Normspektralwertfunktion mit der Qualität der Farbmessung, besonders bei spektral veränderlichen Quellen, einhergeht.

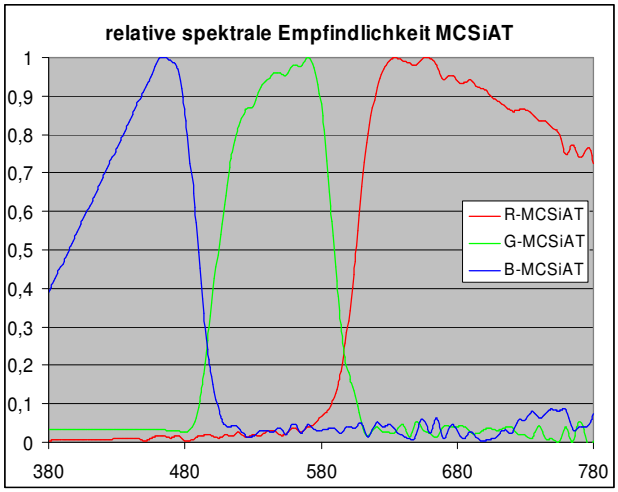
Eine exakte Umsetzung der Normspektralwertfunktion ist nur mit sehr hohem Aufwand und der Verwendung verschiedener im Einzelnen angepasster Mischtechnologien möglich. Die daraus resultierenden hohen Sensorpreise und Baugrößen lassen keinen Einsatz in den betrachteten Marktsegmenten zu. Als preiswertere Lösungen stehen dem gegenüber Fotodiodenstrukturen mit integrierten Filterschichten, die on Chip über den optisch aktiven Feldern aufgebracht werden. Anbieter solcher integrierter RGB-Sensoren sind z. B. HAMAMATSU, TAOS, AVAGO und MAZeT. Die erstgenanten Sensoranbieter verwenden für die Farbseparierung RGB-Absorptionsfilter auf den ICs. Da sich dafür notwendige Filtermaterialien nicht in ausreichender Form rezeptieren lassen, weichen die damit realisierten Sensorempfindlichkeiten meist deutlich von der Normspektralwertfunktion ab.



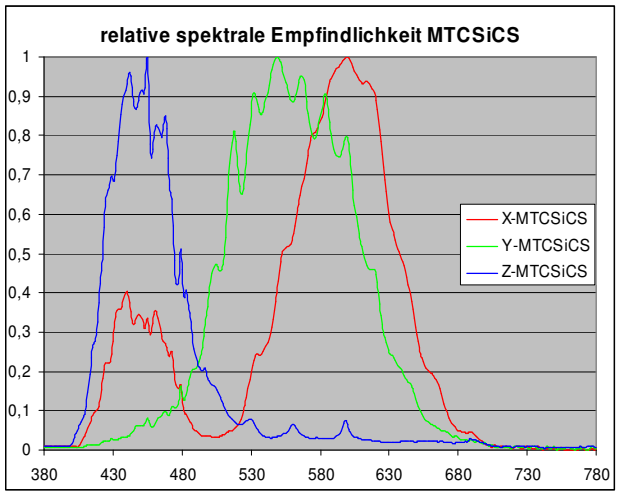
Grafik 1



Grafik 2



Grafik 3



Grafik 4

Abbildung 6; spektrale Empfindlichkeiten von Dreibereichssensoren

Tabelle 1; Gegenüberstellung der Filtereigenschaften

Eigenschaft	**Absorptionsfilter**	**Interferenzfilter**
Maximale Transmission im Durchlassbereich	60…70%	> 95%
Resttransmission im Sperrbereich	10…20%	< 1%
Temperaturstabilität	Abhängig vom Filtermate-rial	Temperaturunabhängig und -stabil
Transmissionseigenschaft	Alterung durch Absorption	Langzeitstabil ohne Drift

Die Restwelligkeit auf dem Empfindlichkeitsverlauf Interferenzfilter basierender Dreibereichssensoren ergibt sich durch die Interferenzwirkung der Einzelschichten eines Filterdesigns. Relevant für Messungen sind diese lediglich für die rein monochromatische Betrachtung und verschleifen in ausreichendem Maße bei der Vermessung von gaußförmigen Strahlungsfunktionen mit einer Halbwertsbreite von mehr als 15nm. Diese Halbwertsbreite wird von den geläufigen PowerLEDs mit FWHM von 20 bis 35nm in ausreichendem Maße überschritten.

Für die Farbortbestimmung werden die abweichenden Maxima der spektralen Empfindlichkeiten der Sensoren von den Empfindlichkeitsverhältnissen der Normspektralwertfunktionen mit einer globalen linearen Korrektur durch Matrizierung an die Normspektralwerte angepasst. Der angewendete Kalibrierungsaufwand richtet sich zum einen nach der technischen Realisierbarkeit in einer Serienfertigung sowie der geforderten Mess- und Regelgenauigkeit.

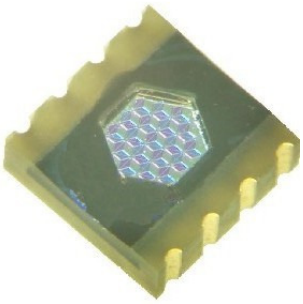


Abbildung 7; MTCSiCS

4 Güte der Farbortmessung und -regelung

Die Matrizierung liefert für jede Art von Dreibereichsfarbsensoren eindeutige Messwerte im Fall, dass die Spektren der RGB-LEDs in ihrer Lage und Form konstant bleiben. Von Interesse ist der Einfluss der Wellenlängendrifts auf die mittels Koeffizientenmatrix ermittelten Farborte.

Für diese Bewertung wurden für verschiedene Dreibereichssensorempfindlichkeiten Koeffizientenmatrizen unter idealen Bedingungen (fester Temperatur) berechnet und die Auswirkungen auf die Farbortbestimmung für Vollfarben und Weißpunkte unter Wellenlängendrifts von +/- 7nm ausgewertet. Die Darstellung und qualitative Bewertung wird jeweils auf den L'u'v' Farbraum nach CIE1976 bezogen.

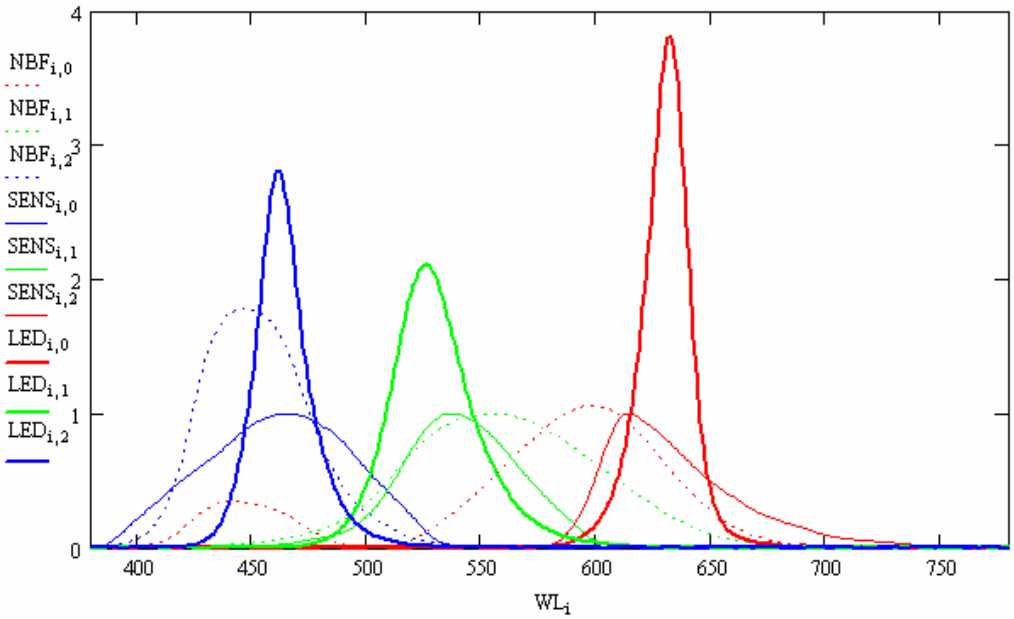


Abbildung 8; Normspektralwertfunktion (gepunktet), Spektrale Empfindlichkeit eines RGB-Dreibereichssensors mit Absorptionsfiltern (dünne Linien) und LED-Spektren (dicke Linien)

Deutlich zu erkennen sind in diesen Grafiken die Unterschiede zwischen spektraler Empfindlichkeit und der Normspektralwertfunktion.

Die Matrizierung des Dreibereichssensors auf die Messaufgabe wurde für die Vollfarben Rot, Grün, Blau sowie deren Kombination Weiß, Schwarz, Gelb, Cyan und Magenta ermittelt. Für die Variation der spektralen Lage wurde ausgehend vom Weißpunkt jeweils eine Komponente Rot, Grün oder Blau um +/- 7nm variiert und im Anschluss jeweils die Vollfarbe spektral variiert. Die Grafiken in Abbildung 9 zeigen die reale Farbortänderung (rote Kreuze) verglichen mit den ermittelten Farborten der Sensorempfindlichkeit und entsprechenden Korrekturmatrix (blaue Kreise).

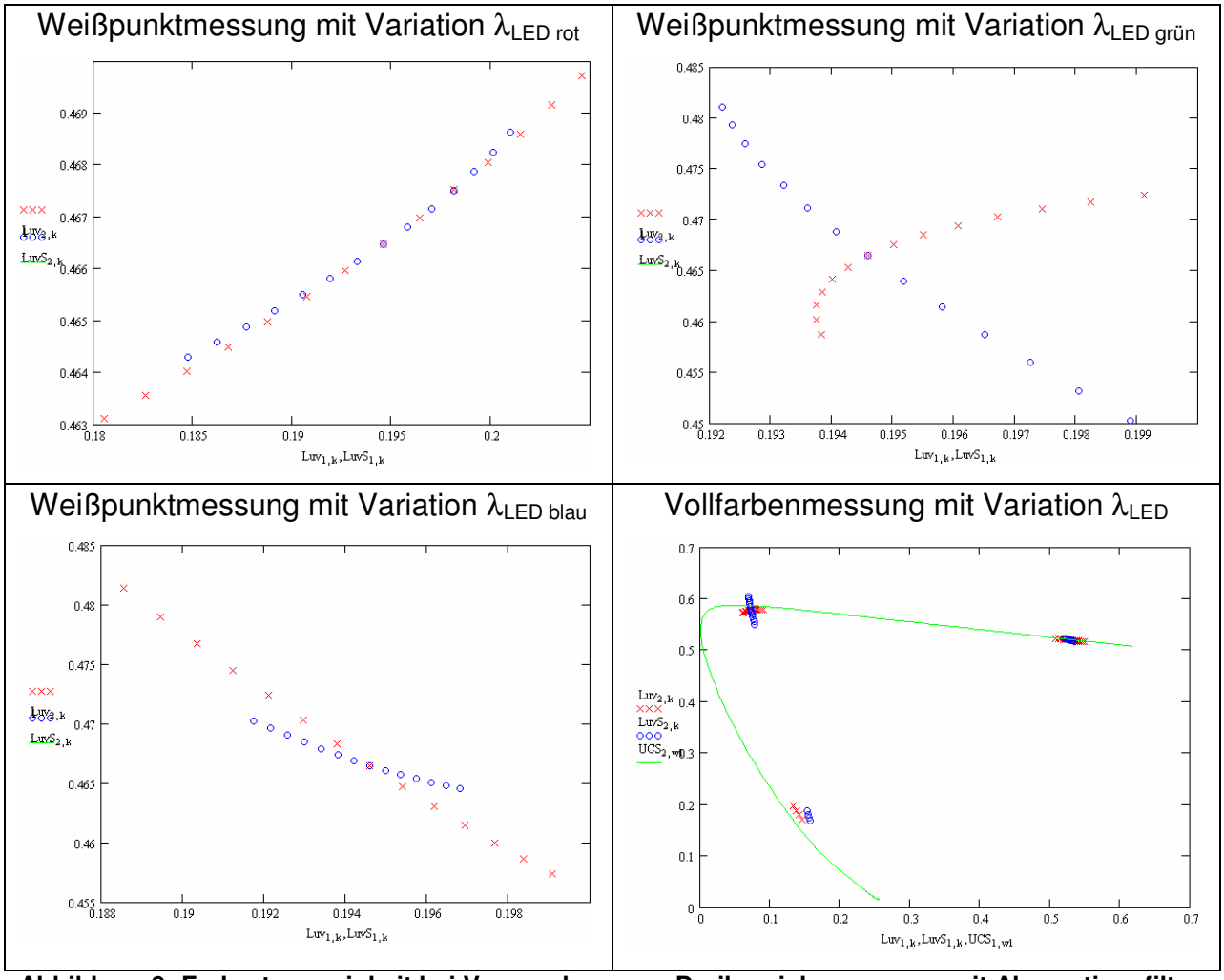


Abbildung 9; Farbortgenauigkeit bei Verwendung von Dreibereichssensoren mit Absorptionsfiltern

Sehr deutlich sind die Abweichungen der Farbortbestimmung in den Grafiken für die Variation der grünen LED und blauen LED zu erkennen. Die theoretischen Farbortdifferenzen, die durch parasitäre Effekte des Sensorsystems eher noch schlechter zu erwarten sind, erreichen hier bis zu einem $\Delta u'v' > 0{,}01$ für die Weißpunkte.

Steigt die Temperatur z.B. der grünen LED, verschiebt sich die Peakwellenlänge der LED zum Langwelligen (Siehe auch Abbildung 2; Änderung der Emissionsspektren als Funktion der Temperatur und Abbildung 10). Der Weißpunkt [A] verschiebt sich dadurch ins rötliche, Punkt [B]. Zur Korrektur der Mischungsverhältnisse und Korrektur des

Weißpunktes müsste hauptsächlich der Anteil der roten LED verringert werden. Der RGB Sensor interpretiert jedoch die Farbortänderung als Farbortverschiebung zum Grünlichen [C] und würde die Regelung zur Verringerung des grünen Anteils veranlassen. Ergebnis dieser Fehlinterpretation durch den RGB-Sensor ist eine effektive Weißpunktnachregelung in Richtung Magenta [D].

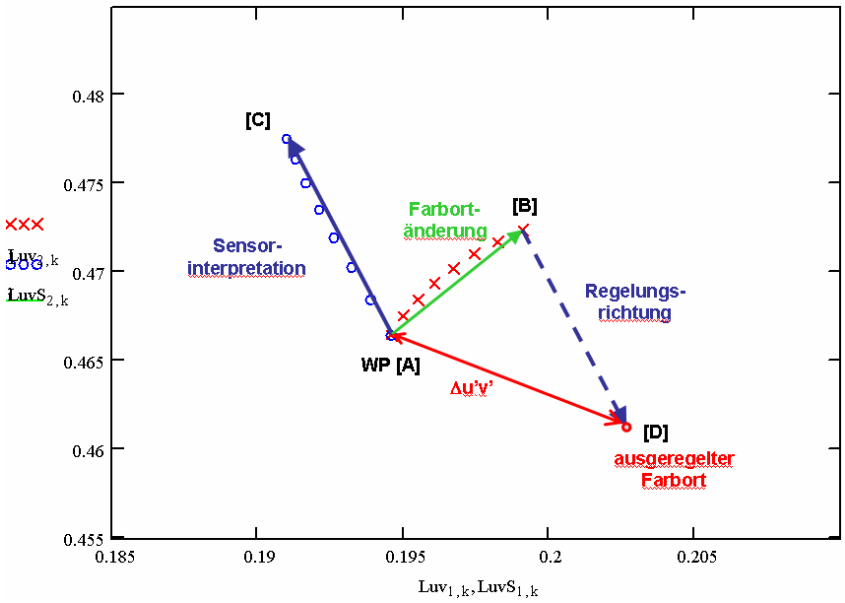


Abbildung 10; Weißpunktänderung bei Temperaturerhöhung der grünen LED

Ein anderes Verhalten dagegen zeigen die XYZ-Sensoren. Abbildung 11 zeigt die spektralen Funktionen unter Einsatz des MTCSiCS-Dreibereichssensors. Die spektralen Empfindlichkeitsverläufe sind dabei im Rahmen der technischen Möglichkeiten an die Normspektralwertfunktion angepasst.

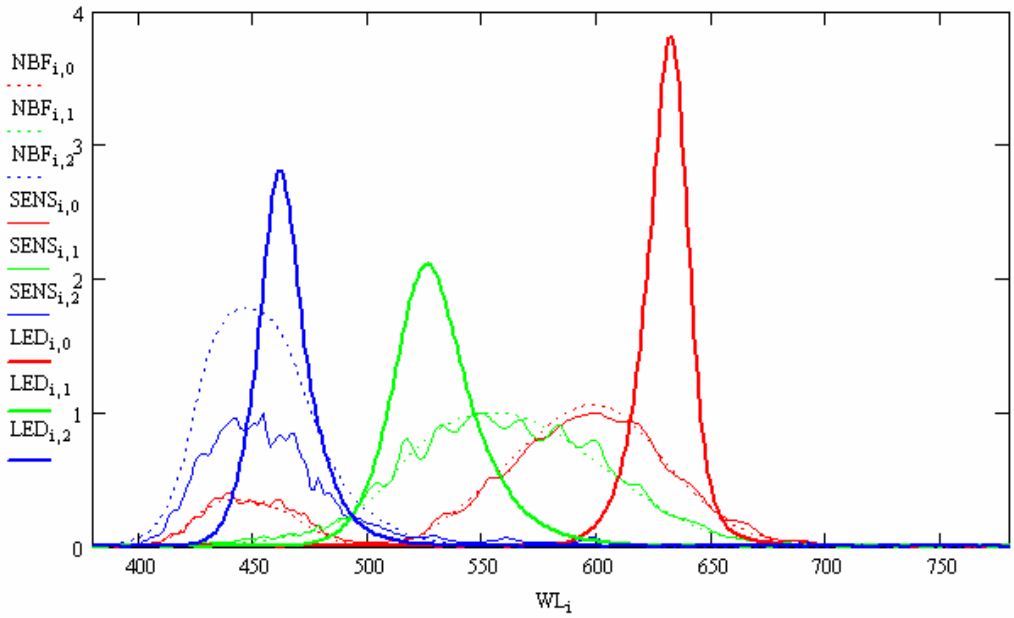


Abbildung 11; Normspektralwertfunktion, Spektrale Empfindlichkeit eines Dreibereichssensors mit optimierten Interferenzfiltern (MTCSiCS) und LED-Spektren (schmalbandige Abtastung)

Die Auswertung der Farbortunterschiede unter Verwendung optimierter Sensorkennlinien in Abbildung 12 zeigen im Vergleich zu den auf Absorptionsfiltern basierenden Dreibereichssensoren um Faktor 5 bessere Farbortdifferenzen $\Delta u'v' > 0{,}002$. Eine Regelung, die auf diese Messwerte aufsetzt, wird somit auch visuell gleichfarbige Ergebnisse erzielen.

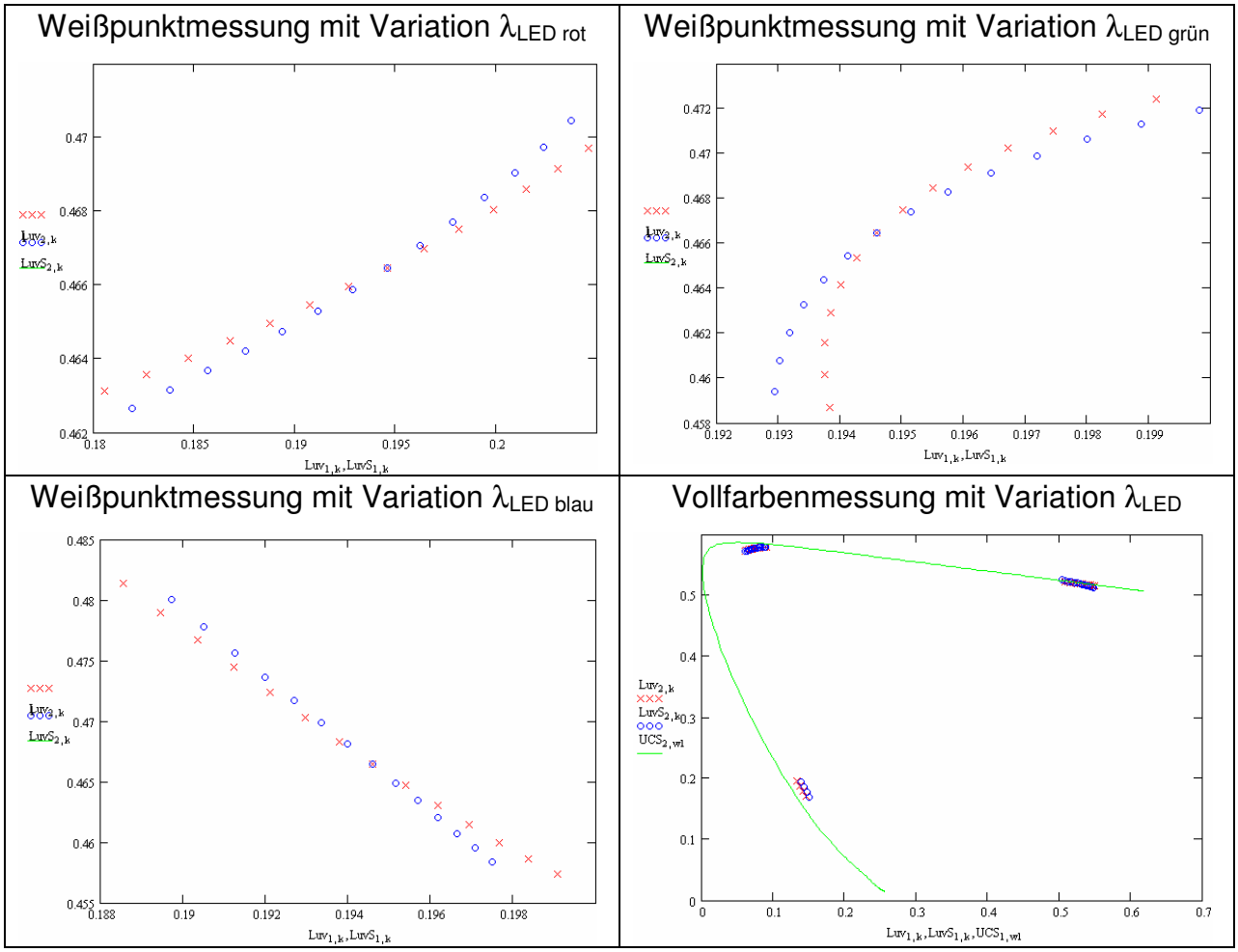


Abbildung 12; Farbortgenauigkeit bei Verwendung von Dreibereichssensoren mit optimierten Interferenzfiltern (MTCSiCS)

Anwendungen in der Farbmessung mit dem Anspruch Farben oder Farbtemperaturen zu beurteilen oder zu regeln, erfordern also ab einer Genauigkeitsklasse „Like human eye“ True Colour Funktion, d.h. möglichst eine genaue technische Umsetzung, Nachbildung oder Referenz des menschlichen Farbempfindens.

Unter den Bedingungen erhöhter Temperaturen und hohen Lichtintensitäten in der Applikation empfehlen sich Interferenzfilter als die bessere Alternative, weil sie langzeit-/temperaturstabil und anpassbar auf die Anwendung sind. Beide Anforderungen für Lichtanwendungen, also „Echtfarben-Funktionalität“ auf Basis dichroitischer Filter, hat MAZeT in ihren neuen True Colour Sensor-ICs umgesetzt.

Literatur

[1] Avago Technologies; Farbschutz für LEDs, ElektronikPraxis Display & Optoelektronik; Mai2006

[2] Perduijn, Krijger, Claessens, Kaito …; Light Output Feedback Solution for RGB LED Backlight Applications; http://www.lumileds.com/pdfs/LOPFeedback4backlight.PDF; 2003

[3] Wiep Folkerts; LED Backlighting Concepts with High Flux LEDs; www.lumileds.com/pdfs/LED_backlight_concepts_LL.PDF; 2004

[4] Tagungsband; Optonet-Workshop: Intelligente LED-Beleuchtungssysteme; 2006

[5] Data sheet; Si photodiode S9032; Hamamatsu; 2002

[6] Data sheet; Agilent HDJD-S722-QR999 Color Sensor; Agilent Technologies; 2005

[7] Data sheet; Avago ADJD-S313-QR999 Miniature Surface-Mount RGB Digital Color Sensor; Agago Technologies; 2006

[8] Data sheet; TCS230 Programmable Color Light-To-Frequency Converter; TAOS; 2003

[9] K.H. Franke; Farbmessung mit Dreibereichssensoren; Toleranz- und Empfindlichkeitsanalysen; Bericht zum Auftrag gemäß Angebot G 20A / 2002; 2005

[10] Sieß, Gunter: Das Auge als Maßstab: in Elektronik Industrie 5/2005, S.70-72 Hüthig Verlag GmbH & CoKg

[11] Höfer, Sascha; Diplomarbeit: Alternative Filtertechnologien in der Dreibereichssensorik; MAZeT GmbH 2006

[12] Nonaka, Y. et al: Development of Color Filters by Pigment Ink Jet Printing I: Fundamental technology; Flat - Panel and Projection technology: IDRC S.238-241 Society for Information Display 1997

[13] Otsuki, Y.: Color Filter Fabrication by Electrodeposition Process: IDW S.73-77 Society for Information Display 1995 o. V.: Übersetzung eines Ausschnittes der Präsentation 93FPDch6.pdf http://www.auto.kyit.edu.tw/2000/class/93Dch6.pdf Stand 19.04.2005