

True Colour mit JENCOLOUR[®] XYZ-Farbsensoren

Karl-Heinz Franke

Technische Universität Ilmenau
PF 100565
D-98684 Ilmenau

karl-heinz.franke@tu-ilmenau.de
www.kb-bmsts.rz.tu-ilmenau.de/franke

Rainer Jahn

Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V.
Gustav-Kirchhoffstraße 5
D-98693 Ilmenau

rainer.jahn@zbs-ilmenau.de
www.zbs-ilmenau.de

Fred Grunert, Frank Krumbein,
Gunter Sieß

MAZeT GmbH
Göschwitzer Str. 32
D-07745 Jena

grunert@mazet.de
www.mazet.de

1. Einführung und Vision

Farbe ist eine Sinnesempfindung des menschlichen visuellen Systems, die für den menschlichen Standardbetrachter mit aufwendiger und kostenintensiver Messtechnik als Farbvalenz direkt oder über den Farbreiz indirekt sehr genau gemessen werden kann. Außerdem lassen sich bei Bestimmung des wellenlängenabhängigen Remittanzverhaltens die Metamerie-Indizes für bedingt gleiche Farben bestimmen oder durch geeignete Messgeometrien Glanzeffekte berücksichtigen. Noch zu erforschende Problembereiche sind spezielle Effekte wie z.B. die räumliche Abhängigkeit von Farbvalenzen im Zusammenhang mit Anisotropien in den Remissionskeulen spezieller Farbstoffe (Metallic-Lacke) oder Transluminiszenz.

Im Zuge der technisch-technologischen Entwicklung sind aber auch die Anforderungen an einfache Einzelfarbsensoren (z.B. JENCOLOUR[®]), Sensorarrays und Farbkameras gestiegen. Das hängt einerseits mit gestiegenen Erwartungen bezüglich Design, Oberflächengüte und Farbkonstanz industrieller Produkte und Konsumgüter zusammen, andererseits aber auch mit ständig steigenden Qualitätsansprüchen bei der Mensch-Maschine-Kommunikation (unterschiedlichste Display- und Drucksysteme, moderner Medien ganz allgemein, e-Commerce). Dabei geben sich die Anwender im Fall der Qualitätssicherung häufig mit der hinreichend genauen Detektion („augengenaue Detektion“) von Farbunterschieden bei Verzicht auf absolute Farbmaßzahlen mit dem Ziel zufrieden, geringe Kosten und gute Integrierbarkeit der erforderlichen Komponenten zu realisieren. Im Falle medialer Anwendungen wird die empfindungsgerechte Reproduktion, d.h. „True Colour“ gefordert, was auf die normgerechte Farbmessung mit den jeweils applikationsspezifisch erforderlichen Genauigkeiten hinausläuft.

Die neuen JENCOLOUR[®] MTCS-Sensoren stellen sich als Dreibereichssensoren genau diesen beiden Herausforderungen. Angesichts solcher Randbedingungen wie minimale Abmessungen, niedrige Kosten und gleichbleibende Qualität ist damit ein wesentlicher Schritt nach vorn gelungen.

	Farbe der Lichtquelle
	Sollfarben (DIN-Testfarbensatz)
	Farben JENCOLOUR [®] MCS (RGB) ohne Korrektur
	Farbe der Lichtquelle
	Sollfarben (DIN-Testfarbensatz)
	Neuer Sensor JENCOLOUR [®] MTCS ohne Korrektur

Abbildung 1: JENCOLOUR[®] MCS und neuer JENCOLOUR[®] MTCS im Vergleich (Farbvalenzen ermittelt auf der Basis des Filterdesigns der Firma MSO)

Dabei ist es wichtig, darauf hinzuweisen, dass auch die „augengenaue Detektion“ nicht um die Farbmessung im weitesten Sinne herumkommt. Da Farbmaßzahlen das Farbempfinden beschreiben, müssen die Sensoren Signale liefern, die mit hinreichender Genauigkeit das Farbabstandsempfinden wiedergeben oder in geeignete Maßzahlen mit dieser Eigenschaft umgerechnet werden können (empfindungsmäßig gleichabständige Farbräume). Nur so gelingt es, die erforderlichen Qualitätsmaße (im einfachsten Falle Schwellen oder Klassifikatoren) für Kontrollaufgaben festzulegen. Wegen der vom Sensorhersteller angestrebten Einsatzbreite bedeutet das, dass mit den oben angesprochenen, eingeschränkten Genauigkeitsansprüchen Farbmessung anzustreben ist. Den Autoren ist dabei bewusst, dass die Genauigkeit im Vergleich zur anspruchsvollen Farbmess-technik eingeschränkt sein wird. Das folgt nicht nur aus den ökonomisch nur begrenzt genau fertigmachen Filtern, sondern zugleich aus den Einschränkungen bezüglich Messgeometrien und Beleuchtungsvarianten.

Eine weitere Forderung, die in der letzten Zeit zunehmend in den Vordergrund rückt, ist die farbrichtige Darstellung bei beliebigen Beleuchtungsbedingungen. Dies erfordert die wiederum applikationsspezifisch mehr oder minder hoch aufgelöste spektrale Messung und ist nicht Gegenstand der Diskussion dieses Beitrages.

2. Farbmessung, Stand der Technik

Grundsätzlich sind für die Farbmessung drei unterschiedliche Methoden bekannt. Die Vergleichsmethode bezieht das visuelle System des Menschen unmittelbar ein. Sie ist für technische Anwendungen eher uninteressant und dient in erster Linie wahrnehmungsphysiologischen und -psychologischen Untersuchungen. Aus technischer Sicht wesentlicher sind das Spektralverfahren und das Dreibereichsverfahren. Für genaue Messungen werden bei allen Verfahren hohe Anforderungen gestellt, z.B. an die Messgeometrie, die Beleuchtung und die Sensorik. Die spektrale Methode bestimmt i.a. den Farbreiz $j(I)$ und ermittelt daraus das Transmissions- oder Remissionsverhalten der Vorlage.

$$b(I) = \frac{j(I)}{S(I)}, \quad t(I) = \frac{j(I)}{S(I)} \quad (1)$$

Da die Wellenlängenabhängigkeit vorliegt, lassen sich daraus beliebige Farbwerte bei beliebiger Beleuchtung ermitteln und z.B. auch Metamerie-Indizes bei bedingt gleichen Farben bestimmen.

Aus Kosten- und Aufwandsgründen wird häufig auf die Dreibereichsmethode zurückgegriffen, obwohl diese mit wesentlichen Einschränkungen verbunden ist. Ergebnisse sind wellenlängenintegrale Farbwerte, die nur für die verwendete Beleuchtung gültig sind. So lassen sich Metamerie-Indizes z.B. nur durch eine Abfolge von Messungen mit unterschiedlichen Beleuchtungen (Bezugslichtart, Testlichtart) bestimmen, die dann also auch physisch verfügbar sein müssen.

Die Verwendung von gerätespezifischen Farbräumen (RGB, YC_rC_b, usw.) ist zwar für Farbkameras wegen der unmittelbaren Ansteuerbarkeit der adäquaten Displays von Vorteil, erfordert aber von vorn herein wegen der i.a. negativen Anteile in den Spektralwertkurven [1] grundsätzlich eine nur in Grenzen genau realisierbare Matrizierung der primären Sensorsignale (Luther-Bedingungen) [2] und für Messzwecke die Ausgabe von gegebenenfalls negativen Farbwerten. Deshalb ist, insbesondere für Punktmessungen, das Normspektralwertsystem XYZ zu empfehlen, das nur positive Spektralwerte aufweist und die gemeinsame Basis für alle anderen Farbsysteme darstellt.

$$\begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} = k \cdot \int_{380nm}^{780nm} S(\mathbf{l}) \cdot \mathbf{b}(\mathbf{l}) \cdot \begin{Bmatrix} \bar{x}(\mathbf{l}) \\ \bar{y}(\mathbf{l}) \\ \bar{z}(\mathbf{l}) \end{Bmatrix} \cdot d\mathbf{l} \quad (2)$$

Da Farbe die Sinnesempfindung des Menschen beschreibt, sind Qualitätsbewertungen der Messergebnisse und Farbvergleiche grundsätzlich in zumindest näherungsweise empfindungsmäßig gleichabständigen Farbräumen (CIE Lab, CIE Luv) vorzunehmen. Die Bezüge zum Normspektralwertsystem sind dabei nichtlinearer Art.

3. JENCOLOUR® MTCS – Sensoren

Im Gegensatz zu den JENCOLOUR®-RGB-Sensoren [3] folgen die neuen JENCOLOUR® MTCS – Sensoren den oben dargestellten Überlegungen durch Realisierung der xyz-Normspektralwertkurven. Zur Ermittlung der hier stets positiven Filtertransmissionen sind die möglichen Basistechnologien für die Sensorik zu berücksichtigen. Die Abbildung 2 gibt eine Übersicht.

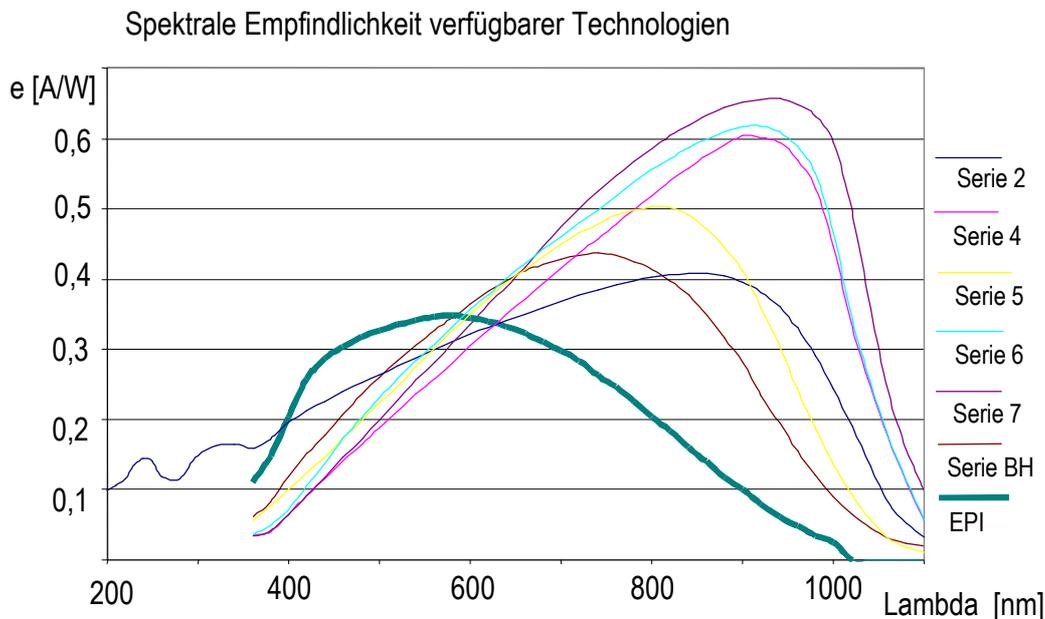


Abbildung 2: Basisempfindlichkeiten für unterschiedliche Sensortechnologien

Die erforderlichen Transmissionsfilter lassen sich dann mit den kanalspezifischen Gerätekonstanten $c_{X(Y,Z)}$ aus den Lutherbedingungen bestimmen.

$$\tau_{X(Y,Z)}(\lambda) = c_{X(Y,Z)} \cdot \frac{NSW_{X(Y,Z)}(\lambda)}{e(\lambda)} \quad (3)$$

Aus energetischen Gründen sollten die Transmissionsgrade in ihrem Maximum ca. 1 erreichen. Bei Auswahl von PIN-Dioden gemäß EPI ergeben sich für die Transmissionskurven leichte, technologisch kaum relevante Verschiebungen zum Kurzwelligen und eine allerdings zu beachtende Vergrößerung des Verhältnisses $X_{\max\text{-kurz}}/X_{\max}$. Die Einzelheiten sind in Abbildung 3 zu erkennen. Dabei wurden alle Kurven im Interesse der Vergleichbarkeit auf ihren Maximalwert normiert.

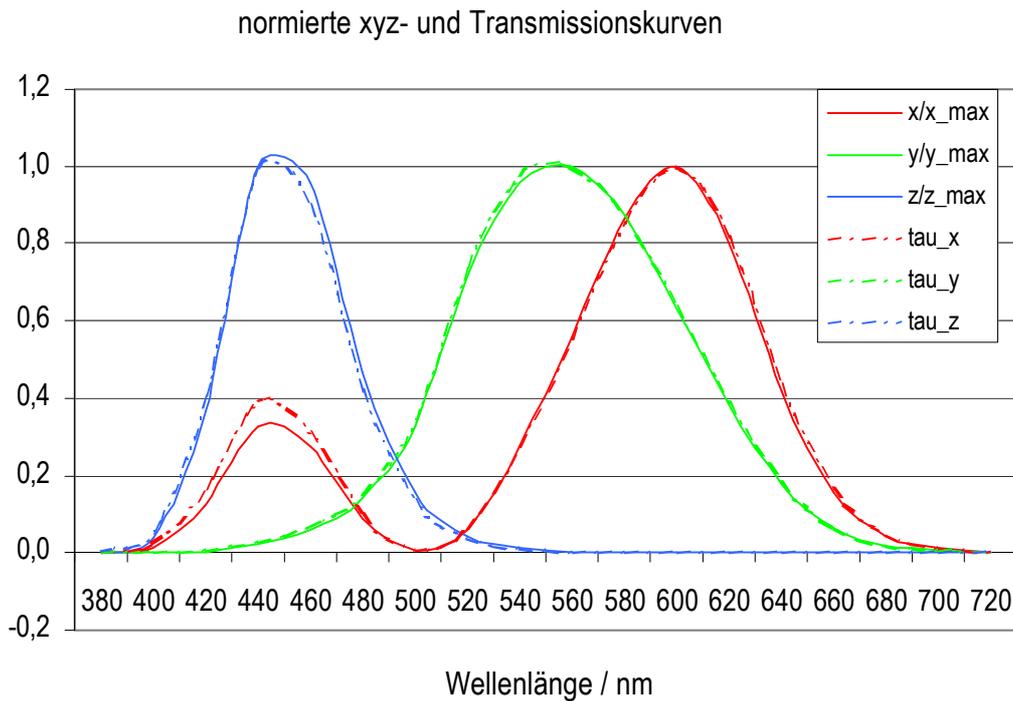


Abbildung 3: Normierte XYZ-Spektralwertkurven und die erforderlichen Transmissionsfilter im Vergleich

Der Ansatz führt nach dem Filterdesign bei ökonomisch noch vertretbarem Aufwand zu geringen, technologisch bedingten Restabweichungen von den geforderten xyz-Transmissionskurven (Abbildung 4),

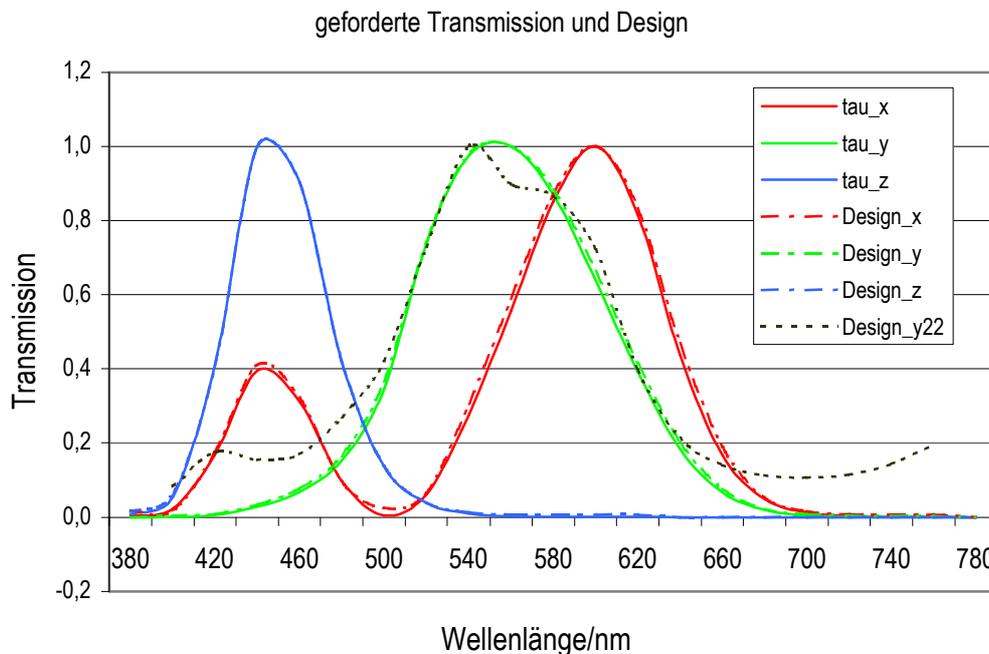


Abbildung 4: Ergebnisse des Filterdesigns (Targetkurven \rightarrow durchgezogen / Designergebnisse \rightarrow Strich-Punkt-Kurven / reduzierter Design- bzw. Fertigungsaufwand am Beispiel y \rightarrow Punkt-Kurve)

für die sich im toleranzfreien Fall der Fertigung ohne zusätzliche Kalibrierung ein mittlerer Restfehler von ca. $\Delta E_{\text{CIE_Lab}} = 2$ bei geringer Streuung der Einzelfarbfehler berechnen lässt (Weiß-LED oder D65, DIN-Testfarben). Durch targetbezogene lineare Korrektur kann beim neuen JENCOLOUR[®] MTCS der mittlere Fehler für die DIN-Testfarben auf $\Delta E < 1$ reduziert werden. Mit den JENCOLOUR[®]-RGB-Sensoren konnte im Vergleich dazu ohne Korrektur nur ein mittlerer Fehler von $\Delta E = 23$ bei maximalen Abweichungen von $\Delta E = 47$ erreicht werden.

Die Differenzen zwischen den spektralen Targetkurven und dem Design beschränken sich im wesentlichen auf die geringfügige Verbreiterung der x- und y-Transmission und darauf, dass das y-Design zwischen x_{kurz} und x_{lang} nicht vollständig auf Null abfällt.

Bei verringertem Aufwand ergeben sich sehr schnell so starke Abweichungen, dass mit erheblichen Fehlern bei der Bestimmung der Farbvalenzen zu rechnen ist, die sich dann auch kaum korrigieren lassen. Um das Problem zu verdeutlichen, wurde in Abbildung 4 als Beispiel auch eine aufwandsreduzierte Filtervariante für y (schwarz, gepunktet, y_{22}) aufgenommen.

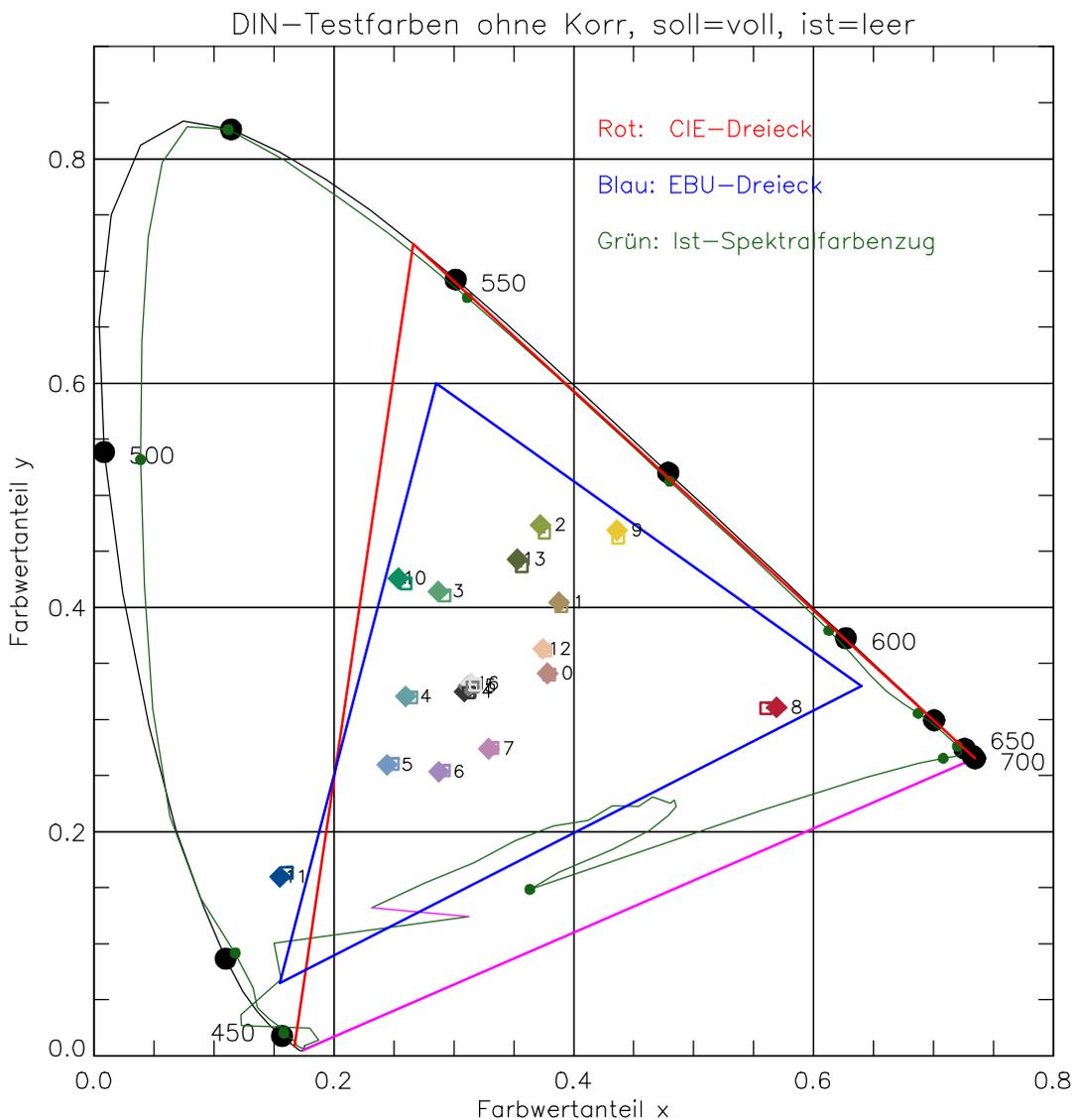


Abbildung 5: Farborte der DIN-Testfarben in der xy-Tafel für den neuen JENCOLOUR[®] MTCS Sensor ohne Korrektur

Für die breitbandigen DIN-Testfarben ist das gute Ergebnis auch aus der xy-Tafel in Abbildung 5 abzulesen. Wie aus Abbildung 5 ebenfalls ersichtlich, ergeben sich für monochromatische oder spektral sehr schmalbandige Reize im toleranzfreien Fall über große Wellenlängenbereiche etwas größere, aber dennoch sehr gute Ergebnisse von $\Delta E \approx 4$, die um 500 nm herum bis auf $\Delta E \approx 8$ ansteigen können. Zu sehr starken Abweichungen kommt es für die diskutierte Anwendungsklasse nur bei sehr kurzen Wellenlängen (ca. 400 nm), was sich sofort aus dem spektralen Ist-Kurvenzug und der resultierenden Purpurgeraden erkennen lässt.

4. Ansatz zur Toleranzanalyse

Zur genauen Bewertung des Einflusses von Toleranzen bei der Filterfertigung ist eine ausführliche Toleranzanalyse erforderlich, die sich aus unterschiedlichen Gründen als ziemlich schwierig erweist. Eine analytische Behandlung scheitert u.a. an den zur Zeit fehlenden analytischen Zusammenhängen der primären (Schichtdicken) und sekundären Toleranzen (Abweichungen in den Filterkurven), am Fehlen einer handhabbaren analytischen Beschreibung der Filterkurven und der Wirkung auf die Farbvalenzen und an der nahezu unbegrenzten Vielfalt möglicher spektraler Reize. Die Autoren haben deshalb zunächst auf eine numerische Abschätzung der Toleranzeinflüsse auf die Farbvalenzen zurückgegriffen, wobei die Vielfalt der Reize durch Modelle für bestimmte Klassen zusammengefasst wurde, die in der Wellenlänge parametrierbar sind (Abbildung 6 und Abbildung 7).

Der Einfluss der primären auf die sekundären Toleranzen wurde dabei auf eine Verschiebung der Mittenwellenlängen reduziert, was aus einem Vergleich der toleranzbehafteten mit den toleranzfreien Filterkurven für eine grobe Abschätzung als gerechtfertigt erscheint. Die dabei in Frage kommenden Verschiebungen bewegen sich betragsmäßig im Bereich von 12 nm.

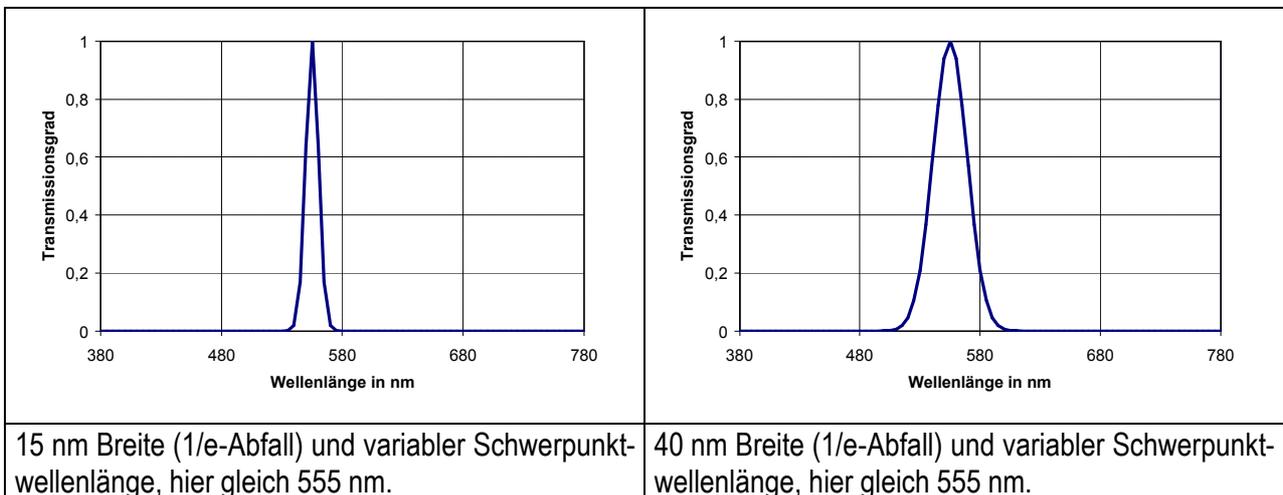


Abbildung 6: Modellfunktionen (schmalbandig)

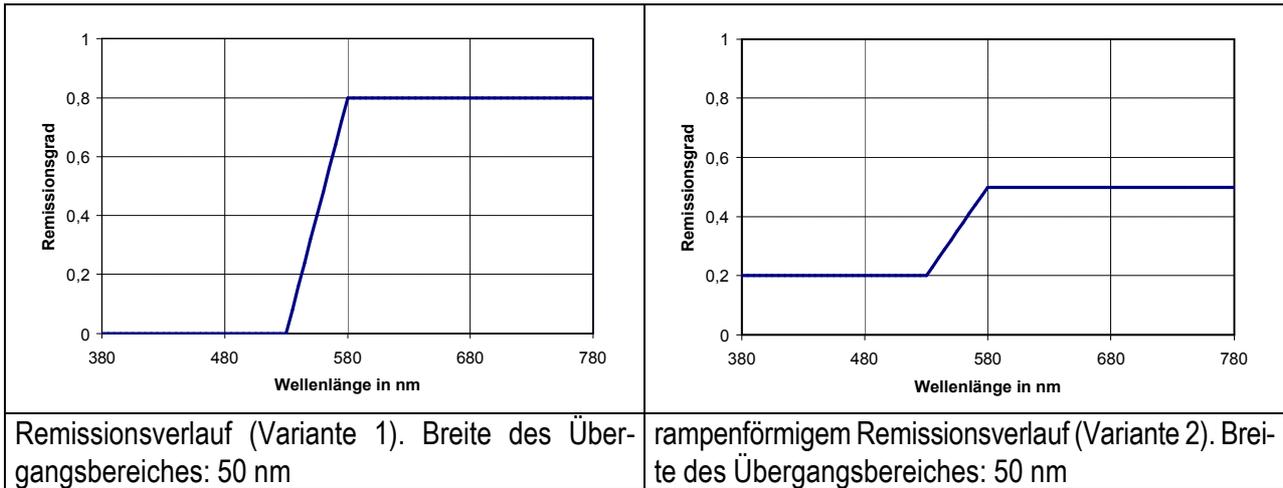


Abbildung 7: Modellfunktionen (Rampen)

Für den zweidimensionalen Definitionsbereich „Schwerpunktwellenlänge der Reize vrs. Verschiebung der Filterkurven“ ergeben sich bei schmalbandigen Reizen (15nm) für den größten Teil der Fläche mittlere Abweichungen von $\Delta E \approx 5$. Diese im Vergleich zu anderen Produkten guten Ergebnisse steigen in begrenzten Bereichen, die durch die maximalen Gradienten in den Spektralwertkurven bestimmt sind, bei maximalen Fertigungstoleranzen bis auf $\Delta E \approx 35$ an. Da dies kein spezifisches Problem dieser Sensorlösung ist, dürfte das für andere Sensoren in gleicher Weise zutreffen. Eine geeignete, evtl. lokale Korrektur erscheint also angebracht.

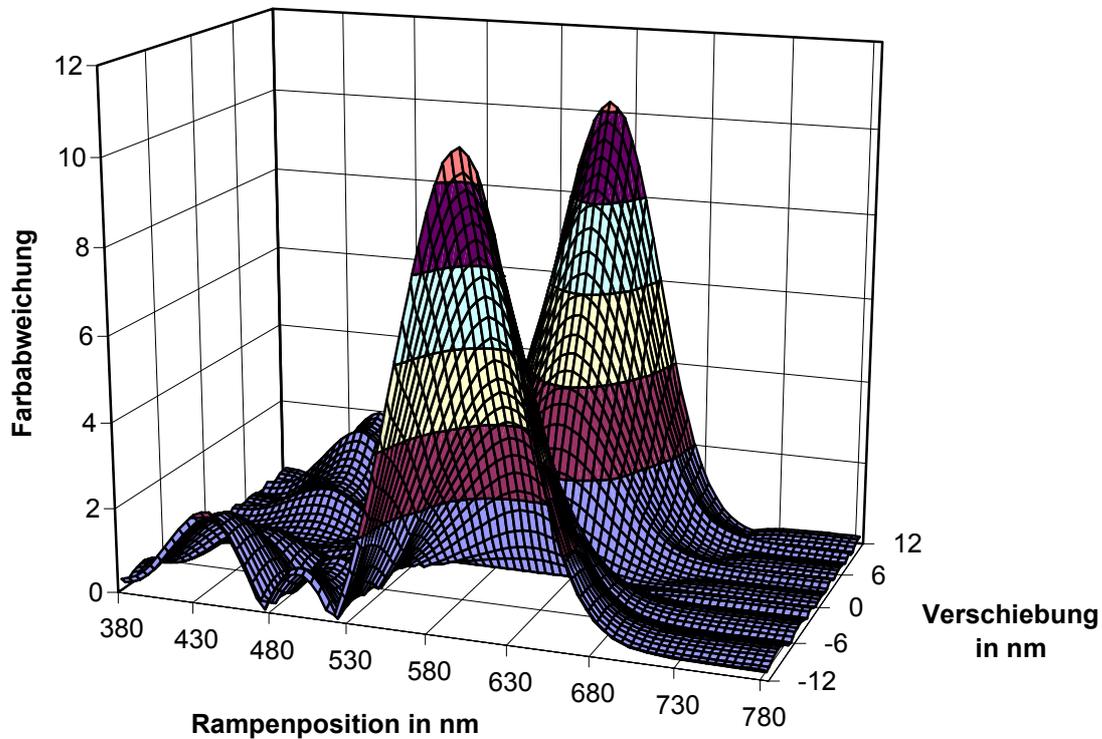


Abbildung 8: Toleranzbedingte Abweichungen $\Delta E_{\text{CIE_Lab}}$ für rampenförmiges Modell der Reize

Breitbandige Reize wurden durch unterschiedliche rampenförmige Modelle mit einem Anstieg der Rampe über einen Bereich von 50 nm modelliert, wobei die Mitte des Anstiegsbereiches in der Wellenlänge verschoben wird. Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse für entsprechende Verschiebungen der X-Kurve. Während im fehlerfreien Fall (Mitte des Verschiebungsbereiches) die Farbabweichungen für alle Rampenpositionen nahezu verschwinden, ergeben sich für den größten Teil der Verschiebungen und Rampenpositionen immer noch sehr gute Werte (vergleichbare Produkte) von $\Delta E < 4$. An den kritischen Stellen (Rampenposition = maximaler Anstieg der Filterkurven) werden Maximalwerte von ca. $\Delta E = 10$ erreicht. Es sollte beachtet werden, dass es sich bei den angegebenen Farbabweichungen um die Maximalabweichungen einzelner Farbvalenzen handelt. Die mittleren Abweichungen für Farbttestsets dürften auch ohne Korrektur bei $\Delta E < 3$ liegen. Durch globale oder gar lokale lineare Korrektur lässt sich der Fehler der Einzelvalenz noch wesentlich verringern, allerdings müsste diese Korrektur für den einzelnen Sensor oder eine Charge erfolgen, so dass die konkreten Toleranzen berücksichtigt werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ausführungen sollten verdeutlichen, dass mit den neuen JENCOLOUR[®]-MTCS-Farbsensoren ein wesentlicher Schritt nach vorn gelungen ist. Das wird den Platz dieser Sensoren in bereits eingeführten Applikationen festigen und helfen, eine Vielzahl von neuen Anwendungsfeldern zu erschließen. Das Vertiefen der Toleranzanalyse und das Ableiten von praxisrelevanten Schlussfolgerungen stellt dabei eine genauso interessante Herausforderung dar wie die Erarbeitung von integrierbaren Lösungen der Signalverarbeitung zur weiteren Genauigkeitssteigerung.

6. Literatur

- [1] Krüger, U., Schmidt, F.: Eigenschaften von digitalen 1Chip-CCD-Kameras bei der Anwendung zur Farbbeurteilung und Farbdarstellung, 5. Workshop Farbbildverarbeitung, 7.10.1999, Ilmenau, Schriftenreihe des ZBS e.V., ISSN 1432-3346
- [2] Franke, K.-H., Pomierski, T., Reulke, R.: Targetbezogene True-Color-Kalibrierung, 5. Workshop Farbbildverarbeitung, 7.10.1999, Ilmenau, Schriftenreihe des ZBS e.V., ISSN 1432-3346
- [3] Buß, W., Sieß, G.: Design und Realisierung eines schnellen Form/Farbsensor-Moduls für Prozessnahe industrielle Anwendungen, 7. Workshop Farbbildverarbeitung, 5.10.2001, Erlangen, Arbeitsberichte des Instituts für Informatik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg, ISSN 0344-3515

Autorenangaben:

Privatdozent Dr.-Ing. habil. Karl-Heinz Franke / Dr.-Ing. Rainer Jahn

Tel.: (+493677) 2010300, Fax: (+493677) 2010302

Dr.-Ing. Fred Grunert / Dipl.-Ing. Frank Krumbein / Dipl.-Ing. Gunter Sieß

Tel.: (+493641) 28090, Fax: (+493641) 280912