

Ortsaufgelöste Farbmessung – Aspekte eines Filterrad-Designs

Udo Krüger, Franz Schmidt

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH

Werner-von-Siemens-Straße 10, D-98693 Ilmenau

e-Mail: udo.krueger@technoteam.de, franz.schmidt@technoteam.de

Zusammenfassung

Im Folgenden Beitrag werden die Grundlagen der ortsaufgelösten Bestimmung von Farbwerten mit Hilfe eines Filterrad-Systems auf der Basis einer digitalen CCD-Kamera beschrieben. Es wird auf die Grundlagen der Filterauswahl und -optimierung eingegangen und auf der Basis von Simulationsergebnissen die erreichte Güte der Anpassung anhand einiger Kriterien dargestellt.

1 Einleitung

Die ortsaufgelöste Bestimmung von licht- und strahlungsphysikalischen Größen ist in den letzten Jahren immer wichtiger geworden. In zahlreichen Applikationen u.a. Analyse von Arbeitsplatz-, Straßen- und Tunnelbeleuchtung und in der Bewertung des Nachtdesigns im Auto, um nur wenige Beispiele zu nennen, gehört die ortsaufgelöste Bestimmung der Leuchtdichte zum Stand der Technik [1].

In zunehmendem Maße wird die ortsaufgelöste Bestimmung von Farbwerten und Farbabweichungen immer interessanter. Dabei geht es einerseits darum, Farbe zu prüfen (Vergleichsmessungen/ Abweichungen zum Sollwert). Andererseits fordern immer mehr Anwender die ortsaufgelöste Messung von Farbmaßzahlen in Standardfarbräumen nach CIE31 und daraus abgeleiteten Farbräumen.

In diesem Beitrag werden die Grundlagen und Realisierungsmöglichkeiten der ortsaufgelösten Bestimmung von Farbwerten mit Hilfe einer digitalen Filterradkamera beschrieben.

2 Farbraumtransformationen

Eine Farbraumtransformation ist eine Abbildung der Punkte eines Farbraumes mit N_{Src} -Basisvektoren in einen anderen Farbraum mit N_{Dst} -Basisvektoren. Für den Übergang zwischen einigen Farbräumen können lineare Transformationen der Form

$$\vec{t}_{Dst} = \mathbf{B} \cdot \vec{t}_{Src}^T \quad (1)$$

genutzt werden, wobei mit $\vec{t}_{Dst}, \vec{t}_{Src}$ die Matrizen der N Farbvalenzen im Ziel- ($N \times N_{Dst}$ -Matrix) bzw. Quellfarbraum ($N \times N_{Src}$ -Matrix) und mit \mathbf{B} ($N_{Dst} \times N_{Src}$ -Matrix) die Transformationsmatrix bezeichnet werden. Diese Operation nennt man Matrizierung.

Für die hier betrachteten Anwendungen ist es interessant, eine Abbildung aus dem durch die Sensorempfindlichkeiten (inklusive Filter und Objektiv) gebildeten Farbraum kRGB in einen Standardfarbraum zu ermitteln. Im Allgemeinen sind diese Transformationen nichtlinear und nur für bestimmte Randbedingungen gültig. Aus der Kenntnis der relativen spektralen Empfindlichkeiten der einzelnen Kanäle und der Aufnahme- bzw. Wiedergaberandbedingungen kann eine angepasste Transformationsmatrix \mathbf{B} für Gleichung (1) ermittelt werden. Die Berechnung der Transformationsmatrix sei kurz erläutert:

Werden die relativen spektralen Daten des Sensors bzw. der Filterkanäle und die Beleuchtung als Vektoren bzw. Matrizen aufgefasst, kann man die Berechnung der Farbvalenzen in Anlehnung an [2] formulieren. Für die Erfassung der Farbvalenzen von N Proben ($\vec{r} \dots N_{\lambda} \times N$ -Matrix der spektralen Probenreflektanzen) mit der Kamera erhält man:

$$\vec{t}_{Src} = (\mathbf{L}_{Src} \cdot \mathbf{A}_{Src})^T \cdot \vec{r} \quad (2)$$

Die Farbvalenzen im Zielfarbraum für die gleichen Proben ergeben sich über:

$$\vec{t}_{Dst} = (\mathbf{L}_{Dst} \cdot \mathbf{A}_{Dst})^T \cdot \vec{r} \quad (3)$$

Mit \mathbf{L}_{Src} , \mathbf{L}_{Dst} wird über eine $N_\lambda \times N_\lambda$ -Diagonalmatrix die spektrale Zusammensetzung der Beleuchtung¹ beschrieben. \mathbf{A}_{Src} beschreibt über eine $N_\lambda \times N_{Src}$ -Matrix die relative spektrale Empfindlichkeit der N_{Src} Farbkanäle des Sensors, \mathbf{A}_{Dst} beschreibt die Spektralwerte des Zielsystems mit einer $N_\lambda \times N_{Dst}$ -Matrix.

Über die Minimierung der quadratischen Fehlersumme, die eine mögliche Optimierungsform darstellt, wird eine Transformationsmatrix berechnet:

$$\mathbf{B}_{opt} = \arg \min_{\mathbf{B}} E \left\{ \left\| \vec{t}_{Dst} - \mathbf{B} \cdot \vec{t}_{Src} \right\|^2 \right\} \quad (4)$$

3 Verfahren für die orts aufgelöste Farbmessung

Bei der Erfassung von Farbvalenzen wird im Wesentlichen zwischen dem Spektralverfahren und dem Dreibereichsverfahren unterschieden, wobei im Falle des Dreibereichsverfahrens auch mehr als 3 Kanäle für die Erfassung möglich sind (DIN5033 Teil 4 bzw. 6)

Entsprechend der Lutherbedingungen [3] sind mindestens drei Sensoren notwendig, deren relative spektrale Empfindlichkeiten \mathbf{A}_{Src} eine Linearkombination der Augenempfindlichkeiten bzw. der Normspektralwertkurven (DIN5033 Teil 2) (repräsentiert durch die resultierende spektrale Empfindlichkeit im Zielfarbraum \mathbf{A}_{Dst}) darstellen, d.h. für die

$$\mathbf{A}_{Dst} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}_{Src}^T \quad (5)$$

gilt. Fehler in der Anpassung der Sensorempfindlichkeiten führen zu Abweichungen in den Farbwerten, die jedoch für bestimmte Messbedingungen korrigiert werden können.

Wird der sichtbare Spektralbereich (ca. 380 bis 780 nm) mit mehr als drei Bewertungsfunktionen $N_{Src} > 3$ erfasst, ergeben sich bei der Korrektur von nicht optimal angepassten Sensorempfindlichkeiten durch Optimierung von \mathbf{B} verbesserte Möglichkeiten zur Berechnung der Farbvalenzen.

3.1 Möglichkeiten zur orts aufgelösten Bestimmung von Farbvalenzen

Bei der orts aufgelösten Bestimmung lichttechnischer Größen wird im Allgemeinen ein Bildsensor für die Erfassung der Daten verwendet. Geht man von der Erfassung von N_{Src} verschiedenen sich überlappenden Spektralbereichen mit Bildsensoren aus, muss für die orts aufgelöste Bestimmung der Farbwerte überlegt werden, wie die einzelnen Spektralbereiche angeordnet werden bzw. wie deren Erfassung gestaltet wird. Die getrennte Erfassung der Spektralbereiche kann optisch, örtlich, zeitlich oder in einer Kombination aus den drei genannten Verfahren erfolgen [4]. Eine neue Art von Sensoren [5] nutzt die wellenlängenabhängige Eindringtiefe von Photonen in das Halbleitermaterial aus. Die Potentialmulden zum Sammeln der Elektronen, die bei der Wechselwirkung von Photonen mit dem Halbleitermaterial entstehen, werden in verschiedenen Tiefen untereinander angeordnet. Dieses Vorgehen ermöglicht eine hohe Ortsauflösung auf dem Sensor ohne die Nachteile der örtlichen Signaltrennung durch Filter auf dem Sensor. Die spektrale Anpassung dieser Sensoren für die Farbmessung dürfte aber problematisch werden.

4 Bewertung der spektralen Anpassung eines Farbmesssystems

Für die Bewertung der spektralen Anpassung von Farbmesssystemen sind Kennwerte notwendig, die einerseits der Optimierung der spektralen Anpassung dienen können und

¹ Für Selbstleuchter wählt man für \mathbf{L} eine Einheitsmatrix und statt der Refektanzen die relative spektrale Ausstrahlung der zu vermessenden Lichtquellen.

andererseits eine Abschätzung der zu erwartenden Messunsicherheiten für den Anwender ermöglichen sollen.

4.1 Farbabstände

Eine häufig verwendete Möglichkeit ist die Berechnung eines mittleren Farbabstandes zwischen den Farbwerten eines Testcharts (z.B. IT 8.2) und den Daten, die das Messsystem unter bestimmten Randbedingungen ermittelt. Die Farbabstände werden hier in ΔE_{ab} -Einheiten angegeben. Diese Vorgehensweise ist nach Meinung der Autoren für die Bewertung der Messunsicherheiten in der Applikation nur bedingt geeignet.

4.2 Integrale Kennwerte

In Anlehnung an die in der Photometrie gebräuchliche Bewertung der $V(\lambda)$ -Anpassung wurde in [6] eine dem Kennwert f_1' aus DIN5032 Teil 6 bis auf die Wichtung mit der Normlichtart A äquivalente Größe eingeführt, die im Folgenden mit f_1^* bezeichnet wird. Die Motivation, die zum Kennwert f_1' führte, ist in [7] nachzulesen.

Zur Bewertung der spektralen Anpassung werden folgende Kennwerte verwendet²:

- f_1' : (DIN5032 Teil 6) Kennwert für die $V(\lambda)$ -Anpassung

$$f_{1i}' = \frac{\sum_{\lambda} |s_{ik}' - s_i|}{\sum_{\lambda} s_i} \cdot 100\% \quad \text{mit} \quad s_{ik}'(\lambda) = \frac{\sum_{\lambda} S_A s_i}{\sum_{\lambda} S_A s_{ik}} s_{ik}(\lambda)$$
- f_1^* : f_1' -Kennwert ohne die Wichtung mit Normlichtart A [6]

$$f_{1i}^* = \frac{\sum_{\lambda} |s_{ik}^* - s_i|}{\sum_{\lambda} s_i} \cdot 100\% \quad \text{mit} \quad s_{ik}^*(\lambda) = \frac{\sum_{\lambda} s_i}{\sum_{\lambda} s_{ik}} s_{ik}(\lambda)$$
- Δ_{\max} : Maximale Abweichung zur Zielfunktion - $\Delta_{\max} = \max_{\lambda} |s_{ik}^* - s_i|$
- $\sum \Delta_i^2$: Summe der quadratischen Abweichungen zur Zielfunktion

$$\sum \Delta_i^2 = \sum_{\lambda} (s_{ik}^* - s_i)^2$$

4.3 Kennwerte auf der Basis von LED-Modellierungen

Die farbmetrische Bewertung von LED's bzw. von LED basierten Systemen gehört zu den Hauptanwendungsfeldern der orts aufgelösten Farbmessung. Daher bietet es sich an, basierend auf den hier vorkommenden spektralen Verteilungen, Messabweichungen anzugeben, die der Anwender in bestimmten Konstellationen zu erwarten hat. Die Verwendung von LED's mit verschiedenen Mittenwellenlängen und Bandbreiten für diese Zwecke wurde bereits in [8] beschrieben. Diese spektralen Ausstrahlungen sollen hier für die Bewertung der spektralen Anpassung herangezogen werden (Bild 6).

Die spektrale Ausstrahlung $S_{\lambda LED}(\lambda)$ einer LED mit der Mittenwellenlänge λ_p (peak wavelength) und der Bandbreite σ_L wird als gaußförmiger Impuls mit der Gleichung:

$$S_{\lambda LED}(\lambda, \lambda_p, \sigma_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} \exp\left(-\frac{(\lambda - \lambda_p)^2}{2\sigma_L^2}\right) \quad (6)$$

² Mit s_i wird die jeweils zu realisierende Normfunktion bezeichnet, d.h. $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ und $V'(\lambda)$, und mit s_{ik} die jeweilige Realisierung dieser Normfunktion mit der Kamera. Für die Normlichtart A (DIN 5033 Teil 7) wird das Symbol S_A verwendet.

modelliert. Für den Anwender sind neben der Leuchtdichte/Lichtstärke im Wesentlichen die Farbkoordinate (x,y) und darauf aufbauend die dominante Wellenlänge und Farbsättigung interessant [9]. Für verschiedene Werte von λ_p und σ_L wird die relative spektrale Ausstrahlung $S_{\lambda LED}(\lambda, \lambda_p, \sigma_L)$ der modellierten LED's nach Gleichung (6) ermittelt. Mit Hilfe des Normvalenzsystems und der relativen spektralen Empfindlichkeiten des Messsystems können dann die Farbkoordinaten und die Differenzen dieser Messwerte berechnet werden. Die Modellfunktionen aus Gleichung (6) approximieren die spektrale Ausstrahlung der LED's nur in erster Näherung³, man erhält aber einen sehr guten Überblick über die zu erwartenden Messabweichungen und die Abhängigkeit der Messabweichungen von der Bandbreite der zu vermessenden Strahlung in einem großen Teil des Standardfarbraumes.

5 Ausgewählte Aspekte beim Design von Filterradssystemen

5.1 Allgemeine Grundlagen

Die wichtigsten Aspekte, die bei der spektralen Anpassung von orts aufgelösten Strahlungsempfängern zu beachten sind, wurden anhand der V(Lambda)-Anpassung in [10] dargestellt. Erste Ansätze zum Filterdesign eines 3Chip-Systems wurden in [11] präsentiert. Beim Design von Filtern für ein Filterradsystem sind weitere Randbedingungen zu beachten. Gleichzeitig sind die Freiheitsgrade für das System hoch, sodass die Optimierung in einem großen Parameterraum stattfindet.

Für die Betrachtungen zum Filterentwurf werden die folgenden Bezeichnungen eingeführt:

N_G Anzahl der Glasarten, die zur Verfügung stehen (Laufindex: $i=0 \dots N_G-1$)

N_K Anzahl der Filter im Filterradsystem (Laufindex: $k=0 \dots N_K-1$)

d_{ik} Dicke des Glases i im Filter k

d_{0i} Dicke des Glases i bei der Probenvermessung (nur symbolisch)

$\tau(\lambda)$ (innerer) Transmissionsgrad eines Glases bzw. Filters

N_M maximale Schichtanzahl in einem Filter

Für den inneren Transmissionsgrad eines Filters k im Filterradsystem erhält man:

$$\tau_k(\lambda) = \prod_{i=0}^{N_G-1} \tau_{0i}(\lambda)^{(d_{ik} / d_{0i})} \quad (7)$$

Wichtige Randbedingungen sind:

- max. N_M Gläser je Filter
- minimale Dicke für die verwendeten Gläser
- Gesamtdicke darf ein bestimmtes Maß nicht überschreiten
- Dicke der Korrekturschicht, damit alle Filter im Filterrad die gleiche Dicke haben
- Filter muss eine gewisse Mindesttransmission im betrachteten spektralen Bereich aufweisen

$$d_{ik} = 0 \text{ für } N_G - N_M \text{ Gläser}$$

$$d_{ik} > d_{\min}$$

$$\sum_{i=0}^{N_G-1} d_{ik} \leq d_{\max}$$

$$d'_k = d_{\max} - \sum_{i=0}^{N_G-1} d_{ik}$$

$$\max_{\lambda} \tau_k(\lambda) \geq \tau_{\max}$$

5.2 Filterdesign

Nach der Festlegung der Randbedingungen ist zu klären, welche Filtergläser für das Design zur Verfügung stehen. Optisches Filterglas ausreichender Qualität (Härte, Langzeitstabilität, Blasenfreiheit) wird im Wesentlichen von den Firmen Schott, Hoya, Corning und

³ Die spektrale Ausstrahlung von LED's ist leicht schief und entspricht eher einem quadrierten Gaußimpuls. Diese Abweichungen spielen aber für die hier durchzuführenden Modellrechnungen keine Rolle.

Kopp hergestellt. Eine Übersicht über mögliche Filtergläser ist in der Zusammenstellung [12] zu finden.

Von den ausgewählten Gläsern sind Probegläser (Schichten definierter Dicke) für die exakte Bestimmung der spektralen Transmissionsdaten anzufertigen. Der Pool der für die Optimierung herangezogenen Gläser darf einerseits nicht zu groß werden, um die Dickenmatrix nicht unnötig zu vergrößern, und andererseits muss man ausreichend viele Gläser verwenden, um die vorhandenen Freiheitsgrade des Systems nutzen zu können.

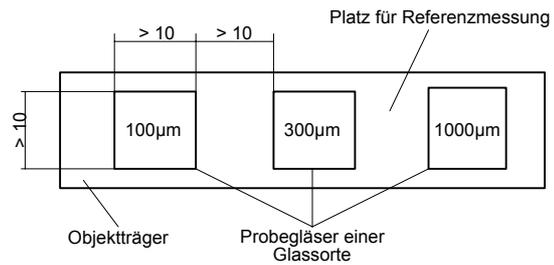


Bild 1: Gestaltung der Probegläser

Ein Filterrad design wird durch die Dickenmatrix \mathbf{D} ($N_G \times N_K$ -Matrix) und die Transformationsmatrix \mathbf{B} ($3 \times N_K$ -Matrix) beschrieben. In Verbindung mit Gleichung (7), der relativen spektralen Empfindlichkeit der Matrix und der relativen spektralen Transmission des Objektivs erhält man die Empfindlichkeiten der einzelnen Kanäle. Über die Kennwerte aus Abschnitt 4 wird das Design bewertet. Während der Optimierung sind die Matrizen \mathbf{D} und \mathbf{B} zu variieren, d.h. es ergeben sich $3 \times N_K + N_G \times N_K$ Optimierungsparameter, und die Einhaltung der Randbedingungen ist zu überwachen. Zusätzlich ist noch zu beachten, dass für die Matrix \mathbf{B} ebenfalls Randbedingungen eingehalten werden müssen, um z.B. den Einfluss des Rauschens in den erfassten Bildern im Zielfarbraum nicht unnötig zu verstärken.

Die Bestimmung der Optimierungsparameter muss neben den oben aufgestellten Randbedingungen die Herstellbarkeit der Filter und eine ausreichende Stabilität der realisierten Filtercharakteristiken gegen kleine Schwankungen der Materialeigenschaften und der realisierten Dicken sicherstellen.

5.3 Beispielfilterrad

Das im Folgenden vorgestellte Filterradsystem (siehe Bild 2) hat sechs Filteröffnungen. Eine Öffnung wird nur mit einem transparenten Glas bestückt, um Anwendungen im nahen Infrarot zu ermöglichen und bei der Einstellung von Schärfe und Bildausschnitt ein schnelleres Arbeiten zu erreichen. Es sind fünf Filter mit den Randbedingungen:

- maximale Anzahl der Gläser je Filter 4
- minimale Dicke je Gläserart $d_{\min} = 80 \mu m$
- Gesamtdicke $d_{\max} = 3 mm$
- Mindesttransmission im Maximum $\tau_{\max} > 0,15$

zu entwickeln. Im Vergleich zu den in [6] beschriebenen Randbedingungen wurden hier bewusst weniger Gläser je Filter und auch eine größere minimale Dicke vorgegeben. Je mehr Gläser verwendet werden je dünner werden die Korrekturschichten, was in der Fertigung und in der Vermessung der Gläser immer größere Probleme bereitet. Die Stabilität der realisierten Anpassung gegenüber Änderungen der realisierten Dicke und der Glaseigenschaften sinkt mit zunehmender Anzahl von Gläsern je Filter. Weiterhin sinkt der maximale Transmissionsgrad der Filter mit steigender Glaszahl je Filter beträchtlich, was zu sehr langen Integrationszeiten in der Anwendung bzw. zu einem schlechten Signal/Rauschabstand führt.

Nach entsprechend optimierter Transformation (Gleichung (4)) können die in Bild 3 dargestellten relativen spektralen Empfindlichkeiten im Vergleich zu den Normspektralwertkurven des 2°-Normalbeobachters erreicht werden.

Kennwerte der Optimierung⁴:

Zielfunktion	f'_1 (%)	f_1^* (%)	Δ_{\max}	$\sum \Delta_i^2$
X2°	3,1	3,1	0,04	0,012
y2° / $V(\lambda)$	1,9	1,9	0,04	0,008
Z2°	4,4	4,3	0,06	0,012
$V'(\lambda)$	6,2	6,0	0,08	0,050

Für die in Bild 4 und Bild 5 dargestellten Beispiellichtquellen ergeben sich die folgenden Abweichungen zwischen Messwerten auf der Basis der Normspektralwertkurven und den Ergebnissen der Filteroptimierung:

	D1	D6	D11	D18	D32	DW	ArtA	D65
dx	0,001	0,006	0,001	0,001	-0,005	0,000	-0,001	-0,001
dy	-0,006	-0,001	0,000	-0,001	0,005	0,002	0,000	0,000

Aus dem Vergleich der Normspektralwertkurven und dem Spektralfarbenzug der Kamera in Bild 5 folgt, dass eine gute Anpassung realisiert werden kann. Im Bereich zwischen 480 und 530nm treten Probleme bei der Berechnung der Farbkoordinaten auf, da hier die spektralen Empfindlichkeiten klein sind und sich geringe Anpassungsfehler gravierend auf die Abweichungen bei der Berechnung der Farbkoordinaten auswirken. Dies trifft auch auf den praktisch nicht relevanten Teil am Anfang (380nm) und Ende (780nm) des Spektralfarbenzuges zu. Die Simulationsergebnisse für die in Abschnitt 4.3 vorgestellten Kennwerte sind in Bild 7 und Bild 8 dargestellt.

6 Danksagung

Die Autoren möchten sich bei den Mitarbeitern des Lichttechnischen Institutes der Technischen Universität Ilmenau für die Unterstützung bei der Durchführung unserer zahlreichen Messungen bedanken. Besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. habil. em. M. Riemann für zahlreiche Hinweise und Anregungen bei der Lösung lichttechnischer Probleme.

Literatur:

- [1] Schmidt, F.; Weyh, S.; Schlichting, B.; Krüger, U.: Digitale CCD-Kameras mit hoher Quantisierungsaufösung – Analyse&Design, 45. Jahrbuch für Optik und Feinmechanik 1998, S.139-166, 1998
- [2] Sharma, G.; Trussell, H. J.: Color scanner performance trade-offs. in Proc. SPIE: Color imaging: device-independent color, color hard copy, and graphic arts, Jan. 1996, vol. 2658, pp. 270-278, 1996
- [3] Luther, R.: Aus dem Gebiet der Farbreizmetrik. Zeitschrift für techn Physik, Nr. 12, S.540-558, 1927
- [4] Schmidt, F.; Krüger, U.: Eigenschaften von digitalen 1Chip-CCD-Kameras bei der Anwendung zur Farbbeurteilung und Farbdarstellung. Tagung der Deutschen Farbwissenschaftlichen Gesellschaft, 10.-11.09.1999, Ilmenau, 1999, auszugsweise veröffentlicht im 47. Jahrbuch für Optik und Feinmechanik 2000, S.114-140, 2000
- [5] Merrill, R.B.: Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well structure. US Patent No.5965875, PD:24.04.1998 und http://www.foveon.net/X3_tech.html
- [6] Muray, K.; Schanda, G.; Schanda, J.: Filter fabrication techniques for LED photometry. CIE LED Symposium 97 on Standard Methods for Specifying and Measuring LED Characteristics, CIEx013, pp.61-64, 1997
- [7] Geutler, G.; Krochmann, J.; Özver, Z.; Röhrich, W.: Über die Kennzeichnung der Güte des Angleiches der relativen spektralen Empfindlichkeit lichtempfindlicher Empfänger an die $V(\lambda)$ -Funktion. Optik 43(1975) No. 5, S.453-469, 1975
- [8] Jones, C.F.: Colorimetry, chromaticity space and LEDs. SPIE Conference on Illumination and Source Engineering, San Diego, California, July 1998, SPIE Vol. 3428, pp 100-114, 1998
- [9] CIE: Measurement of LED's. Publication CIE127-1997, 1997
- [10] Krüger, U.: Technological aspects of spectral correction adjustment of space resolved radiation detectors. Light & Engineering, Vol. 9, No. 3, pp.61-71, 2001
- [11] Stefanov, E.: Optimierung der spektralen RGB-Anpassung einer 3-Chip Farbbildkamera zur True-Color-Meßbilderfassung. Lux Junior, 4. Internationales Forum für den lichttechnischen Nachwuchs, 24.-26.09.1999, Dörfeld, S.83-87, 1999
- [12] Dobrowolski, J.A.; Marsh, G.E.; Charbonneau, D.G.; Eng, J.und Josephy, P.D.: Colored filter glasses: an inter-comparison of glasses made by different manufactures. Applied Optics, Vol.16 No.6, pp. 1491-1512, 1977

⁴ Darstellung und Kennwertberechnung ergeben sich aus den gemessenen Probegläsern und vermessenen Matrizen. Die Filter wurden noch nicht realisiert.



Bild 2: LMK98 Color (CCD-Kamera mit Filtrerrad (6 Öffnungen) zwischen Objektiv und CCD-Matrix)

Spektrale Empfindlichkeit eines Filtrerradsystems (LMK98-Color)

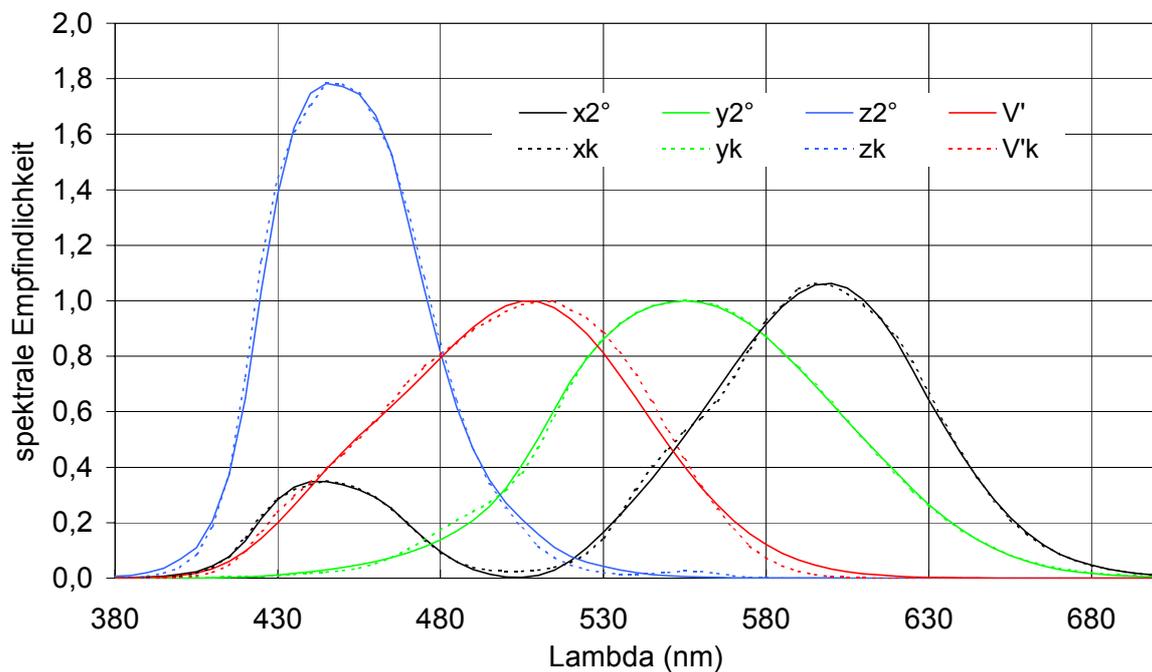


Bild 3: Spektrale Empfindlichkeit eines Filtrerradsystems (Simulation LMK98 Color)

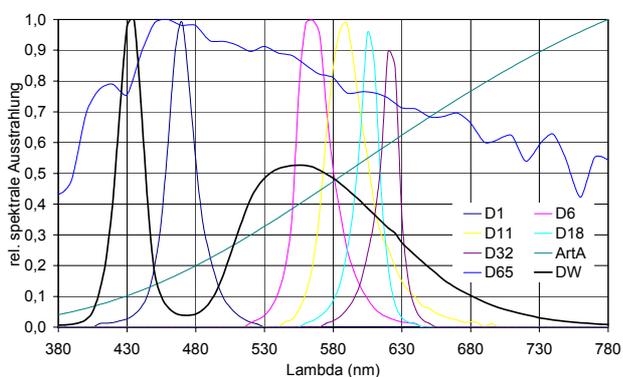


Bild 4: Spektrale Ausstrahlung einiger Beispielquellen (LED's und Normlichtarten)

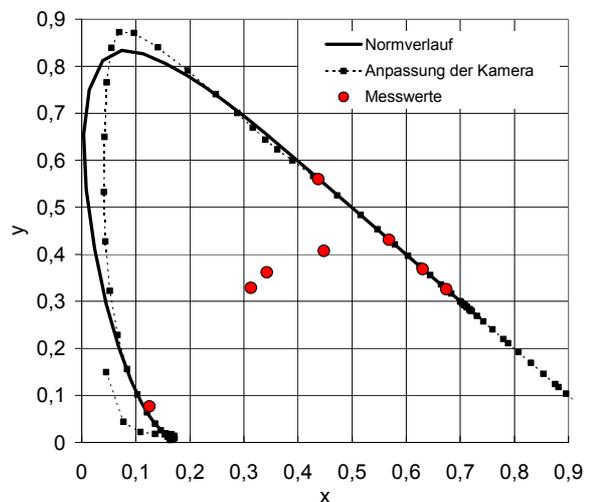


Bild 5: Vergleich der Spektralfarbenzüge (Norm- und Kamerasystem) und Markierung der Beispielmesswerte

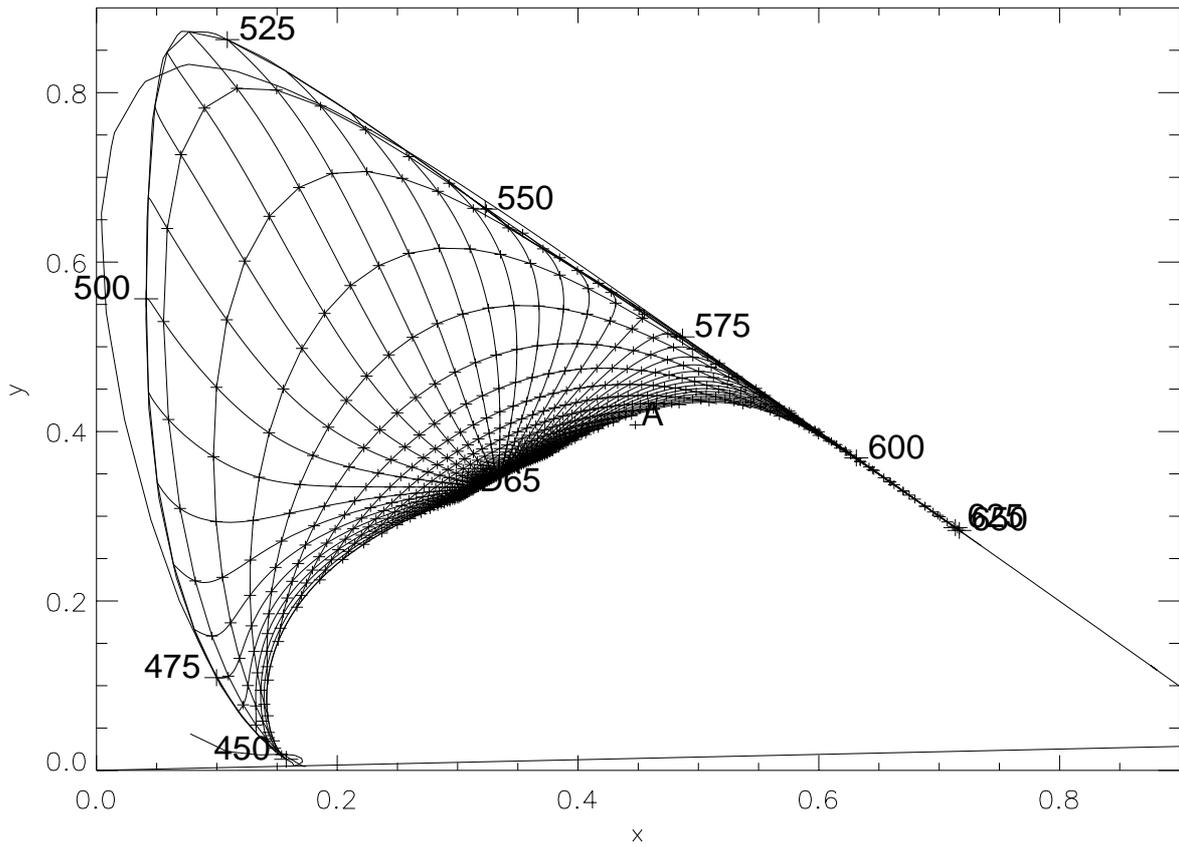


Bild 6: Farbkoordinaten simulierter LED's für verschiedene Mittenwellenlängen und Bandbreiten (Markierung der Linien gleicher Mittenwellenlänge und gleicher Bandbreite mit $\lambda_p = 450(5)650 \text{ nm}$, $\sigma_L = 1(10)100 \text{ nm}$)

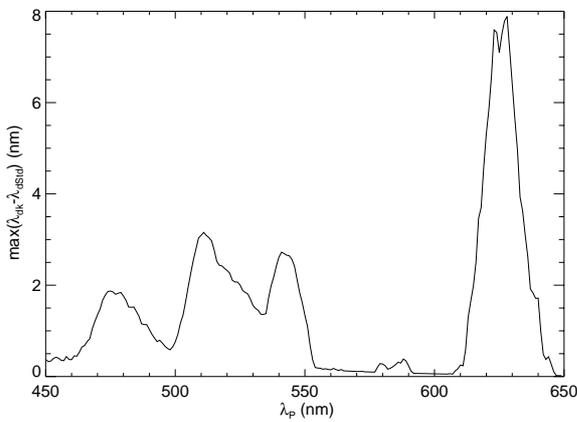


Bild 7: Maximale Abweichung bei der Bestimmung der dominanten Wellenlänge für simulierte LED's (Bild 6) bei der Messung mit dem Filterradsystem

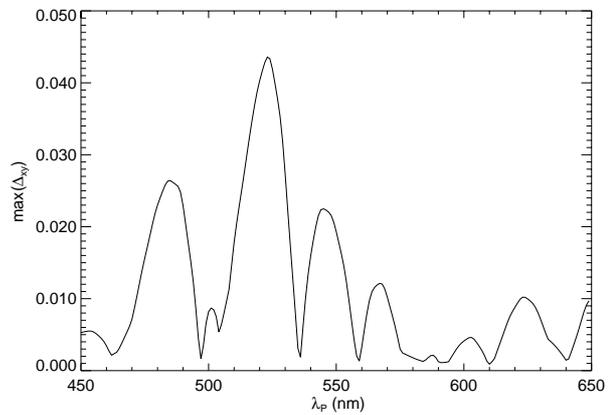


Bild 8: Maximale Abweichung bei der Bestimmung der Farbkoordinate (Δ_{xy}) für simulierte LED's (Bild 6) bei der Messung mit dem Filterradsystem