

# Spektral modellierbare Lichtquelle zur Erzeugung beliebiger Spektren durch Einsatz eines “Digital Mirror Device” Lichtquelle zur verbesserten Farbseparation

Markus Schnitzlein und Bernhard Frei

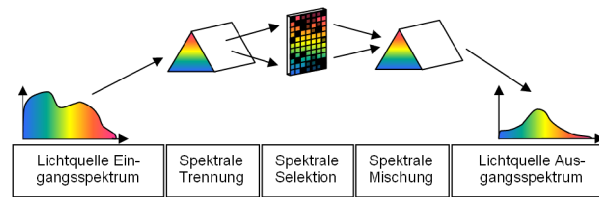
ChromaSens GmbH  
(bis zum 30.11.2004 Océ Document Technologies GmbH)  
Abteilung für Scannertechnik und Bildverarbeitung  
78467 Konstanz, [www.chromasens.com](http://www.chromasens.com)  
Email: [markus.schnitzlein@odt-oce.com](mailto:markus.schnitzlein@odt-oce.com)

**Zusammenfassung.** Die mehrkanalige bzw. multispektrale Bildgewinnung gewinnt zunehmend ein größeres Interesse – vor allem in Bezug auf die spektrale Repräsentation der zu erfassenden Objekte. Die Kenntnis der spektralen Eigenschaften ermöglicht eine differenzierte farborientierte Verarbeitung der erzeugten Bilder. Neben der spektralen Erfassung von Vorlagen, die heute durch den Einsatz mehrkanaliger Kamerasysteme erfolgt und durch die Verwendung von speziellen mathematischen Verfahren, die zu relativ guten Schätzungen der spektralen Eigenschaften der Vorlage führen, ergibt sich ein weiteres bedeutendes Verbesserungspotenzial durch Verwendung von Lichtquellen mit definierten Spektren.

## 1 Einleitung

Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte spektral modellierbare Lichtquelle ermöglicht die Erzeugung beliebiger spektraler Verteilungen mit einer Genauigkeit von ca.  $\pm 1\text{nm}$  und einer Intensitätsgenauigkeit von  $\pm 1\%$ . Die Lichtquelle wird durch einen Digital Light Processor (DLP) gesteuert, mit dessen Hilfe die Anteile von einzelnen Basisspektren kombiniert werden. Die Ermittlung der Arbeitsparameter des DLPs zur Erzeugung eines beliebigen Beleuchtungsspektrums wird mittels eines iterativen Vektorraum-Projektionsverfahrens gelöst. Die Lichtquelle eignet sich sowohl als Ersatz für optische Farbfilter bei der digitalen Bildaufnahme, aber auch als Lichtquelle zur verbesserten farblichen Wiedergabe von Gewebe – und Hautfarben, sowie zur multispektralen Farbwiedergabe in Projektionssystemen. Im Rahmen der Präsentation werden sowohl Ergebnisse von spektralen Messungen an der modellierbaren Lichtquelle gezeigt, als auch die mathematischen Verfahren zur Ansteuerung des DLPs diskutiert.

Alle bisher gezeigten Ansätze zur Farberfassung und Farbwiedergabe werden primär mit dem Ziel eingesetzt, den visuellen Eindruck, den ein Farbreiz verursacht, nachzubilden, wobei der erste Anspruch darin besteht, die Tristimulus-Werte der visuellen Wahrnehmung berechnen zu können. Da sich dieses Ziel

**Abb. 1.** Methodischer Aufbau des Selektionssystems

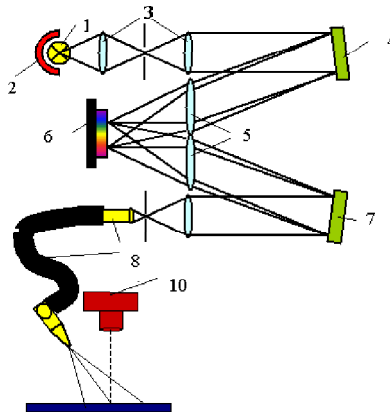
letztlich nur durch die spektrale Nachbildung erreichen lässt, muss versucht werden, diese spektralen Eigenschaften möglichst exakt zu bestimmen. Mit der etablierten Technik ist dies derzeit nicht möglich, da Sensoren und Wiedergabefarben noch bevorzugt in  $X, Y, Z$ -Werten beschrieben werden. Die Mehrdeutigkeit dieser Beschreibung führt einerseits zu Metamerie-Effekten, andererseits zu der Notwendigkeit Erfassungs- und Wiedergabesysteme durch empirische Methoden aufeinander abzustimmen, um im Verlauf des Verarbeitungsprozesses eine konstante Farbbehandlung zu ermöglichen (Color Management)

Mit der nachfolgend beschriebenen spektral modellierbaren Lichtquelle wird eine spektral exakte Farbwiedergabe und Farberfassung möglich, wobei die Genauigkeit mit der die Farbe dargestellt oder erfasst werden kann, im System wählbar ist.

Die Basisidee der spektralen modulierbaren Lichtquelle ist die spektrale Aufteilung der Emission der Primärlichtquelle mit Hilfe von dispersiven optischen Elementen (Blaze-Gitter oder Prisma) und die spektral selektive Zusammenführung einzelner Wellenlängenbereiche zu der gewünschten Spektralverteilung. Die spektrale Selektion erfolgt durch einen DMD (Digital Mirror Device, in der Literatur oft auch als DLP Digital Light Processor bezeichnet). Durch Ansteuerung des DLP-Chips können, während der Bilderfassung, beliebige Wellenlängenbereiche (und deren Kombination) auf die Vorlage gebracht werden. Die auf diese Weise erhaltenen mehrkanaligen Bilder enthalten pixelweise, in unterschiedlichen Bildebenen, die spektralen Remissionseigenschaften der Vorlage. In Abb. 1-2 ist der einfacheren Darstellung wegen der reflektiv arbeitende DMD durch einen allgemeinen SLM (Spatial Light Modulator) ersetzt.

Die Lichtquelle (1) wird durch eine effiziente Xenon-Hochdrucklampe realisiert, deren emittiertes Licht über einen elliptischen Spiegel (2) auf einen Spalt fokussiert wird. Das durch den Spalt hindurch tretende Licht wird durch eine Kollimatoroptik (3) parallel gerichtet und trifft auf ein Beugungselement (4), das durch seine Gitterstruktur (Blaze) das polychromatische Licht der Lichtquelle wellenlängenabhängig in unterschiedlichen Winkeln ablenkt. Das hiermit spektral aufgefächerte Lichtbündel wird über eine Abbildungsoptik (5) auf den DLP-Chip (6) abgebildet. Hier können selektiv einzelne Wellenlängenbereiche ausgeblendet werden, sodass nur das aktiv benötigte Licht durch die zweite hindurch gesammelt wird. Das auf diese Weise erhaltene Strahlbündel enthält immer noch winkelabhängige Spektralanteile, die erst durch das zweite Blaze-Gitter (7) in eine gemeinsame Richtung gebeugt werden. Durch die Kollimatoroptik (8)

**Abb. 2.** 1 Lichtquelle, 2 Reflektor, 3 Kollimator mit Spalt, 4 Beugungselement (Blaze-Gitter), 5 Abbildungsoptik, 6 Spektraler Selektor (DLP), 7 Blaze-Gitter zur Strahldurchmischung, 8 Lichtleiter, 9 Objekt, 10 Digitale Kamera



wird das Licht in einen faseroptischen Lichtleiter (9) eingekoppelt, und die Szene beleuchtet. Das Objekt wird über eine digitale Kamera beobachtet.

Das auf diese Weise erhaltene Strahlbündel enthält immer noch winkelabhängige Spektralanteile, die erst durch das zweite Blaze-Gitter (7) in eine gemeinsame Richtung gebeugt werden. Durch die Kollimatoroptik (8) wird das Licht in einen faseroptischen Lichtleiter (9) eingekoppelt, und die Szene beleuchtet. Das Objekt wird über eine digitale Kamera beobachtet.

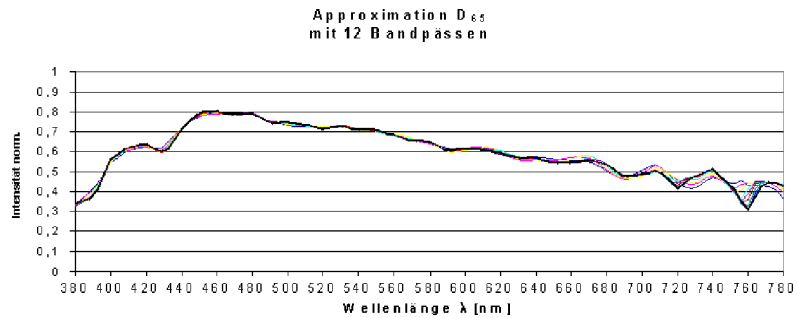
**Spektrale Approximation von Spektren.** Die Berechnungsverfahren, die zur Anwendung kommen, um die optimalen Beiträge der erzeugten Bandpässe zu ermitteln, führen zu einer sehr guten Annäherung der Zielspektren. Es wurden testweise die Optimaleinstellungen für alle Munsellfaben aus “Book of Colors”, die “Natural Colors” aus der Pointer-Datenbank und die standardisierten Lichtfarben (A, B, C, D50, D65, F2, F11) berechnet.

Es zeigt sich, dass das beschriebene Verfahren alle o. g. Spektren mit einer Abweichung deutlich besser als  $\Delta E = 0,5$  beschreiben kann. Besondere Bedeutung gewinnt dieses Ergebnis vor dem Hintergrund, dass bereits mit sehr großen Bandbreiten von ca. 50 nm sehr gute Approximationen erzeugt werden konnten. Die Zielsetzung besteht nun darin, eine vorgegebenes Spektrum  $E(\lambda)$  (Zielspektrum) durch Superposition der einzelnen Spektralverteilungen  $S_{pq}(\lambda_p, \sigma_q)$  linear zu kombinieren.

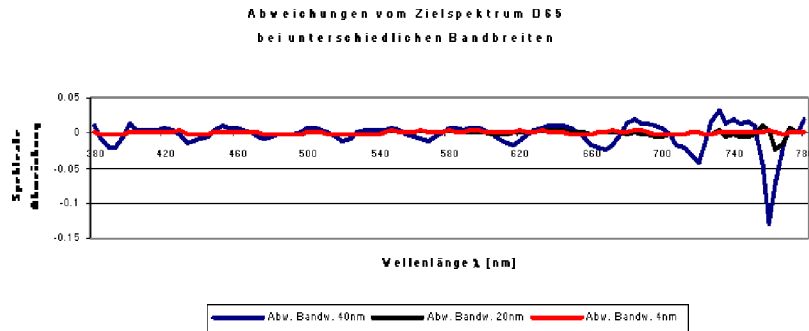
$$E(\lambda) = \sum_{p=1}^s \sum_{q=1}^t x_{pq} S_{pq}(\lambda_p, \sigma_q)$$

Der Index  $p = 1, \dots, s$  beschreibt die Position der Spiegeln des DMDs, über die das Spektrum in Richtung der Wellenlängenachse verteilt ist – der Index  $q = 1, \dots, t$  beschreibt die Position Spiegeln des DMDs, senkrecht zur Wellenlängenachse – in dieser Richtung ändert sich die Bandbreite der Spektralverteilung bei fester Mittenwellenlänge  $\lambda_m$  der Verteilung. Von H. Stark und Y.

**Abb. 3.** Die Approximation des Normlichtspektrums D65 (schwarze Linie) durch bis zu 12 Bandpässe. Beginnend mit der breitesten Basisfunktion (48 nm) werden schrittweise Bandpässe mit geringerer Bandbreite angeboten, sodass sich letztlich die beste Näherung durch die Linearkombination der Basisfunktionen mit der geringsten Bandbreite ergibt.



**Abb. 4.** Die Abweichung der Intensitätswerte der Zielfunktion von den Approximationsfunktionen für Normlicht D65 bei Bandbreiten von bis zu 40nm, 20nm und 4nm.

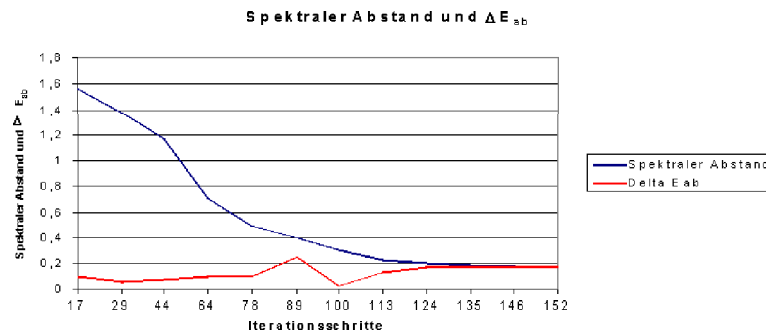


Yang [1, 2] wurde ein iteratives Lösungsverfahren zur auf Basis von Vektorraum-Projektionsmethode vorgeschlagen. In unserem Fall soll eine Linearkombination von spektralen Basisfunktionen gefunden werden, die zur besten Approximation eines Zielspektrums führt, wobei die Beiträge der breitbandigen (und damit effizienten) Basisfunktionen möglichst groß werden sollen.

## 2 Ergebnisse

Die in Abb. 3-5 dargestellten Ergebnisse zeigen die Approximation des Normlichtspektrums: D65. Zielsetzung ist es, eine möglichst gute spektrale Näherung des Zielspektrums zu erreichen – durch die Linearkombination von Basisspektren mit möglichst großer Bandbreite. Die Basisspektren sind hierbei symmetrische Trapezfunktionen mit einer mit einer Halbwertsbreite von 48nm, 44nm, 40nm, 36nm, 32nm, 28nm, 24nm, 20nm, 16nm, 12nm, 8nm und 4nm.

**Abb. 5.** Die beiden Kurven zeigen den Verlauf der spektralen Abweichung (Summe der stützstellenweise berechneten Abweichungsquadrate zwischen Zielfunktion und Approximationsfunktion). Diese Funktion muss prinzipbedingt monoton fallen. Die zweite Kurve zeigt den Verlauf des  $\Delta E_{ab}$  Wertes. Dieser Wert zeigt zwar auch eine fallende Tendenz – die unterschiedliche lokale Näherungen der Approximationsfunktionen an das Zielspektrum führt jedoch zu einem nicht monotonen Verhalten.



### 3 Zusammenfassung

Mit der beschriebenen Lichtquelle ist es möglich beliebige Zielspektren zu erzeugen und in schneller Folge zu wechseln, sodass sich über die reine Lichtquelle hinaus, eine Vielzahl von Applikationen ergeben, in denen eine wählbares Emissionsspektrum entscheidende technische Vorzeile bieten würde. Als Beleuchtungssystem für Kamera- und Scannersysteme zur Gewinnung hochwertiger und hoch aufgelöster Bilder von großformatigen Vorlagen, ist diese Lichtquelle bereits in Erprobung.

Die Lichtquelle eignet sich sowohl als Ersatz für optische Farbfilter bei der digitalen Bildaufnahme, aber auch als Lichtquelle zur multispektralen Farbwiedergabe in Projektionssystemen. Von besonderer Bedeutung ist aber die Erzeugung von optimal angepassten Spektren zur Vergrößerung des farblich wahrnehmbaren Kontrastes von medizinischen Objekten, wie z.B. Haut – und Gewebestrukturen. Untersuchungen zur Optimierung von Operationsbeleuchtungen werden derzeit vorgenommen.

Die Berechnung der spektral optimalen und lichttechnisch effizienten Linearkombination von Basisspektren ist derzeit noch aufwendig. Aus heutiger Sicht bietet sich auf der Basis der Vektorraum-Projektionsmethode der am besten nutzbare Ansatz.

### Literaturverzeichnis

1. Stark H. Vector Space Projections. John Wiley&Sons; 1998.
2. Levi A, Stark H. Signal rstoration from phase by projection onto convex sets. J Opt Soc Am 1983;73:810–822.