

Spektral modellierbare Lichtquelle zur Erzeugung beliebiger Spektren durch Einsatz eines „Digital Mirror Device“

Markus Schnitzlein¹, Bernhard Frei¹ und Andreas Willert²

¹ Océ Document Technologies GmbH, 78467 Konstanz
Abteilung Scanner-Technik und Bildverarbeitung,
markus.schnitzlein@odt-oce.com
www.odt-oce.com

² TU Chemnitz – Institut für Print- und Medientechnik
www.tu-chemnitz.de/pm

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. Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte spektral modellierbare Lichtquelle ermöglicht die Erzeugung beliebiger spektraler Verteilungen mit einer Genauigkeit von ca. $\pm 1nm$ 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 multispektralen Farbwiedergabe in Projektionssystemen. Im Rahmen des Vortrags werden sowohl Ergebnisse von spektralen Messungen an der modellierbaren Lichtquelle gezeigt, als auch die mathematischen Verfahren zur Ansteuerung des DLPs diskutiert.

1 Einleitung

1.1 Aufbaukonzept der Lichtquelle

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 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 Bearbeitungsprozesses 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).

Da Dispersionselemente naturgemäß eine winkelabhängige Spektralverteilung produzieren, hängt die Güte der spektralen Trennung direkt vom Divergenzwinkel des einfallenden Lichtbündels ab. Je größer der Divergenzwinkel ist, umso größer wird die spektrale Breite des selektierten Wellenlängenbereiches. Die Parallelisierung des einfallenden Lichtes erfolgt durch eine Spaltblende. Die Güte der Fokussierung des von der Primärlichtquelle emittierten Lichtes auf diese Spaltblende bestimmt direkt die Effizienz des Gesamtsystems.

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 den nachfolgenden Abbildung ist der einfacheren Darstellung wegen, der reflektiv arbeitende DMD durch ein allgemeinen SLM (Spatial Light Modulator) ersetzt.

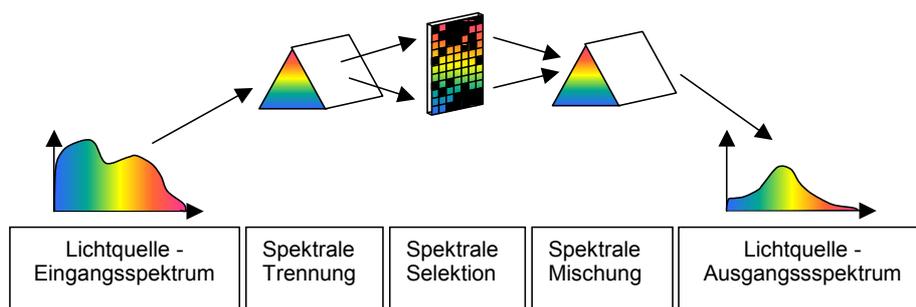


Abb. 1. Methodischer Aufbau des Selektionssystems

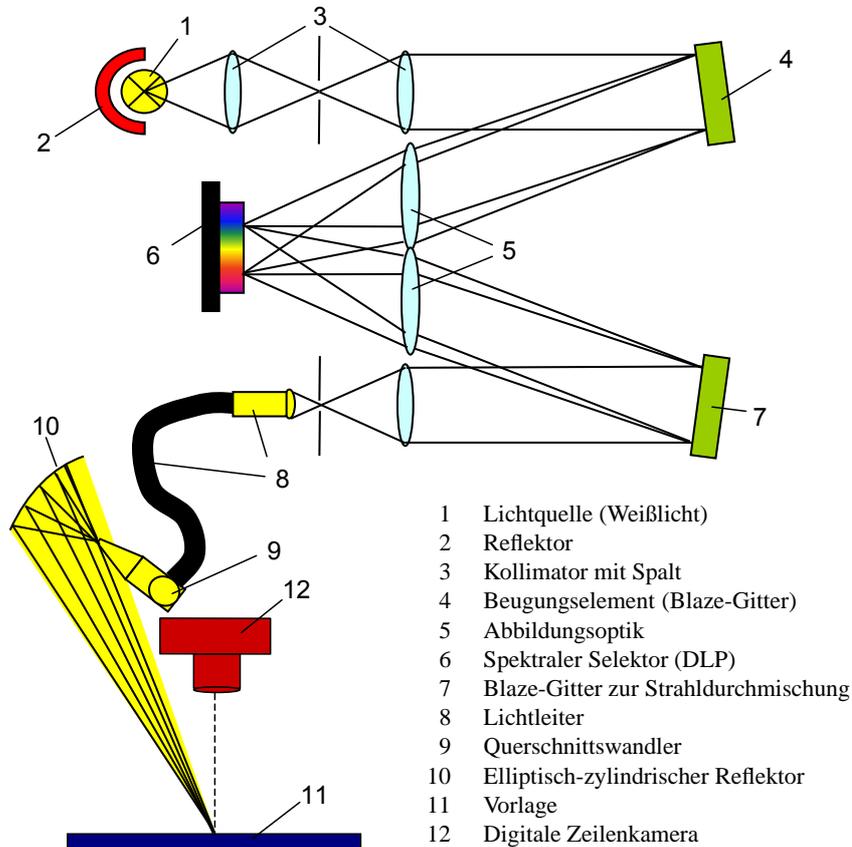


Abb. 2.

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 Abbildungsoptik 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) wird das Licht in einen faseroptischen Lichtleiter (9) eingekoppelt, der durch eine Umsortierung der Lichtleitfasern einen spaltförmigen Austrittsquerschnitt (10) realisiert. Das hier divergent austretende Licht wird mit Hilfe eines

lang gestreckten elliptisch-zylindrischen Spiegels auf die Vorlage (11) fokussiert. Das Beleuchtungssystem ist derartig konzipiert, dass das vom Lichtleiter emittierte Licht streifenförmig auf das Objekt projiziert wird. Der Austrittsspalt des Lichtleiters befindet sich im ersten Fokus der Ellipse - die Vorlage im zweiten Brennpunkt. Durch die langen Übertragungswege zwischen der Quelle und der Vorlage, kommt es zu einer sehr guten Lichtdurchmischung entlang des Beleuchtungsstreifens auf dem Objekt. Diese Durchmischung ist sowohl hinsichtlich der Abstrahlungsinhomogenitäten des Lichtleiters selbst, als auch hinsichtlich der spektralen Durchmischung des Lichtbündels, günstig. Das von der Vorlage remittierte Licht wird mit einer Zeilenkamera (12) mit 10 Bit Grauwertauflösung detektiert.

Die folgenden technischen Aspekte dieses Erfassungssystems müssen genauer betrachtet werden:

1. Effizienz:

Bei der Parallelisierung des von der Lichtquelle divergent emittierten Lichts entsteht ein hoher Energieverlust, der in der geringen Größe der Spaltblende begründet liegt. Je größer die Spaltblende realisiert werden kann, umso größer ist die Effizienz des Gesamtsystems, aber in gleicher Weise verschlechtert sich die spektrale Trennung des Systems. Die lichttechnische Effizienz des Gesamtsystems bewegt sich zwischen 1% - 3%.

2. Ansteuerung des DLP

Die Berechnung der Einstellparameter der einzelnen DLP-Spiegelemente ist sehr komplex und bedarf einer algorithmischen Optimierung. Die Rechenzeit für eine Optimaleinstellung, hängt stark von der spektralen Homogenität des Zielspektrums ab. Bei Berechnung aller Einstellparameter der ca. 800.000 Mikrospiegel bewegt sich die Rechenzeit im Bereich von 5 - 60 min.

3. Spektrale Durchmischung

Die spektrale Durchmischung des Lichtbündels ist von großer Bedeutung, um eine spektral homogene Beleuchtung der Szene zu realisieren. Alternative Möglichkeiten ohne zweites (rückführendes) Beugungselement müssen untersucht werden.

4. Separate Verwendbarkeit der Lichtquelle

Die Verwendung der Lichtquelle, als Normlichtquelle mit einstellbarem Spektrum ist im Laufe der Forschungsarbeit an dem beschriebenen Scansystem immer wichtiger geworden. Eine spektral einstellbare und steuerbare Lichtquelle ist nicht nur im Umfeld der Bilderfassung, sondern auch im Bereich der Messtechnik von Bedeutung.

1.2 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 Munsellfarben 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.

Mit dem beschriebenen spektralen Trennungssystem erhalten wir eine 2-dimensionale Spektralverteilung $S(\lambda, \sigma)$ in der DMD-Ebene, die durch die einzelnen Spiegel des DMDs in ihrem Beitrag zum Gesamtspektrum gesteuert werden können. 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 Spiegel des DMDs, über die das Spektrum in Richtung der Wellenlängenachse verteilt ist - der Index $q = 1, \dots, t$ beschreibt die Position Spiegel des DMDs, senkrecht zur Wellenlängenachse - in dieser Richtung ändert sich die Bandbreite der Spektralverteilung bei fester Mittenwellenlänge λ_m der Verteilung.

Von H. Stark und Y. Yang [2], [1] wurde ein iteratives Lösungsverfahren zur auf Basis von Vektorraum-Projektionsmethode vorgeschlagen, das für diesen Ansatz sehr gut geeignet ist. Das Verfahren wird in den angegebenen Literaturstellen sehr gut beschrieben.

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 soll.

Es ist schnell einsichtig, dass sich bei Verwendung von allen Einzelspiegeln (ca. 800.000), als parametrisierbares Gewicht einer spektralen Basisfunktion, ein sehr rechenzeitintensiver Prozess ergibt.

Bei einer Spiegelanzahl von $1024 \times 768 = 786432$ Elementen ergibt eine Anzahl $2 \times (786432)^2$ Multiplikation = $1,2 \cdot 10^{+12}$ und ebensovielen Multiplikationen pro Iterationsschritt. Voraussichtlich liegt die Anzahl an Iterationsschritten, die für eine „gute Approximation“ benötigt werden - in Abhängigkeit von der Komplexität des spektralen Verlaufs - etwa im Bereich der Vektorlänge, sodass sich eine Anzahl von etwa 10^{+18} Operationen zur Berechnung eines Zielspektrums ergibt.

Die Anzahl an Bandpässen, die modelliert werden, wurde auf 12 Bereiche reduziert. Die Anzahl an Stützstellen des Spektrums wurde von 401 auf 101 reduziert. Dies ist keine signifikante Restriktion, da auf Basis reale Spektren auf dieser Auflösungsskala als glatt angesehen werden können. Exemplarisch wurden einige Spektren mit der vollen Stützstellenanzahl modelliert, wobei sich keine signifikanten Ergebnisveränderungen ergaben.

Für die Approximation wurden 12 Bandpässe in einer 4 nm Abstufung der Bandbreite vorgeben: 4 nm, 8 nm, 12 nm, 16 nm, 20 nm, 24 nm, 28 nm, 32 nm, 36 nm, 40 nm, 44 nm, 48nm. Die Mittelwellenlängen der Bandpässe wurden im Bereich von 380 nm - 780 nm im 4 nm-Abstand (101 Stützstellen) im Spektrum festgelegt.

2 Ergebnisse

Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse zeigen die Approximation von zwei Normlichtspektren: D65 und F11.

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. Die Flankensteilheit beträgt immer 4nm.

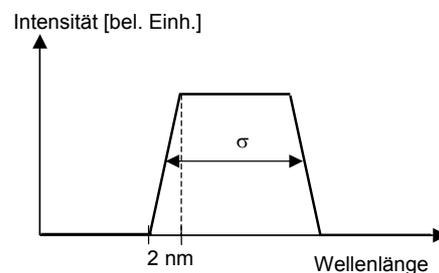


Abb. 3. Grundform der Basisfunktionen. Die Bandbreite σ variiert von 48 nm bis 4 nm in Schritten 4 nm

Die Darstellungen zeigen:

Abb. 4, 7: Die Approximation des Normlichtspektrums D65 bzw. F11 (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. 5, 8: Die Abweichung der Intensitätswerte der Zielfunktion von den Approximationsfunktionen für Normlicht D65 und F11 bei Bandbreiten von bis zu 40nm, 20nm und 4nm.

Abb. 6, 9: 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 ΔE_{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.

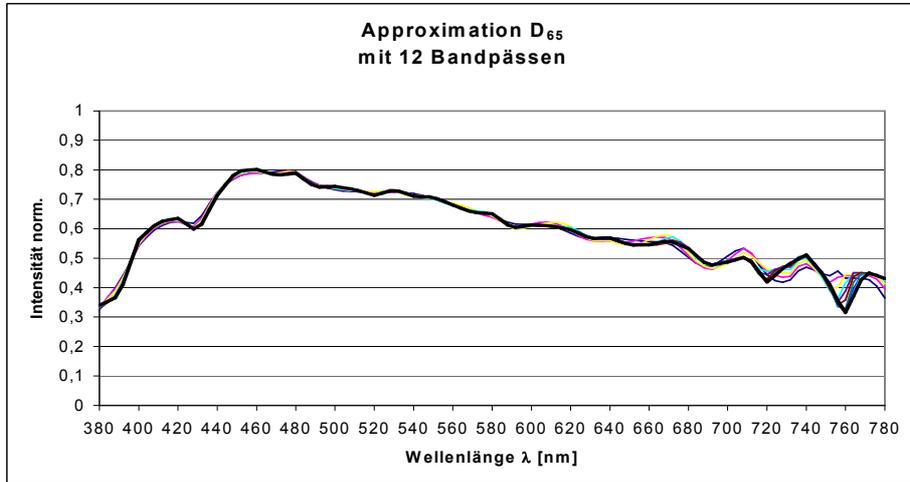


Abb. 4.

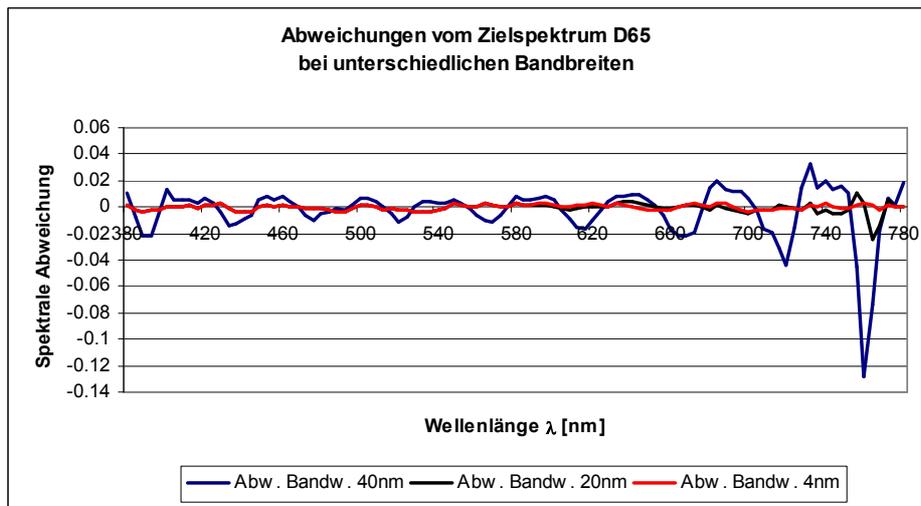


Abb. 5.

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

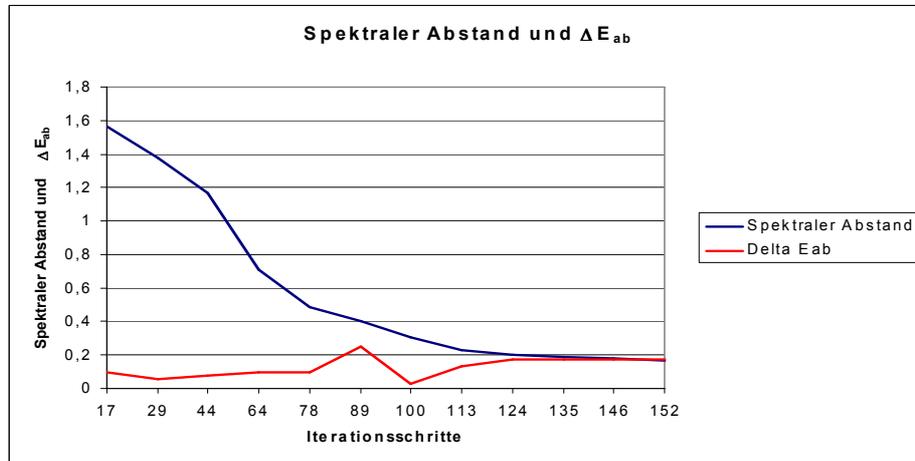


Abb. 6.

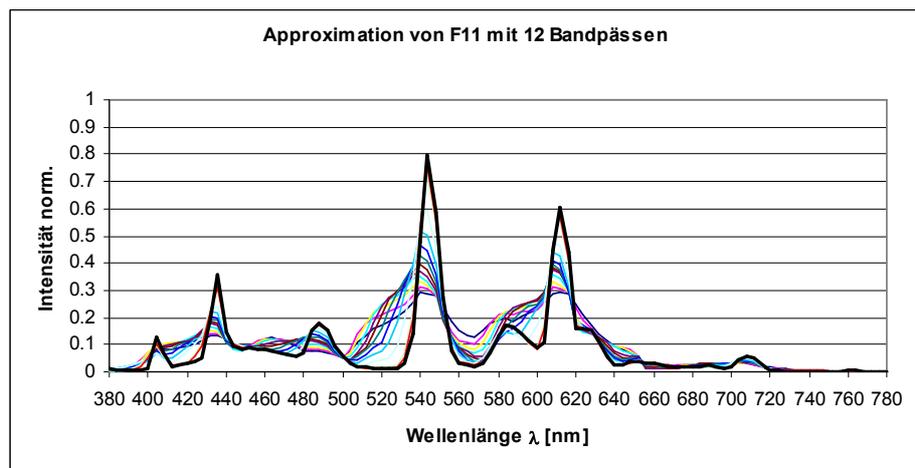


Abb. 7.

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. 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. Weitere lineare Optimierungsverfahren müssen im Hinblick auf die beschriebene Anwendung aber noch untersucht werden.

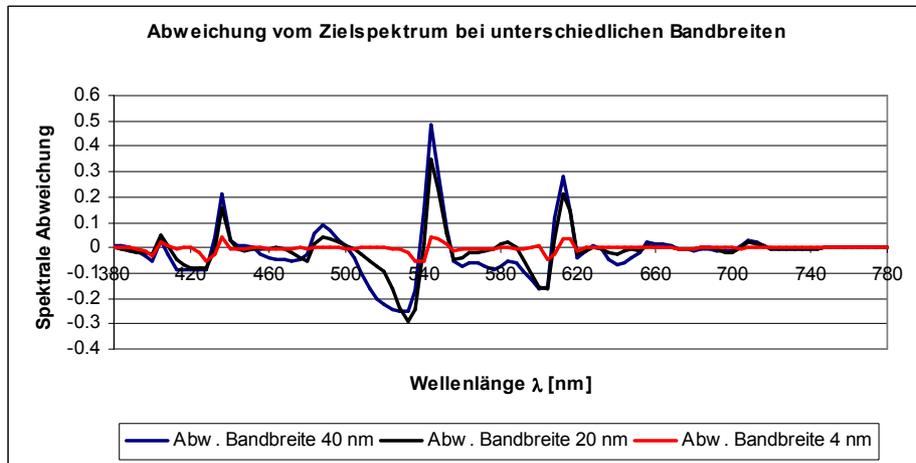


Abb. 8.

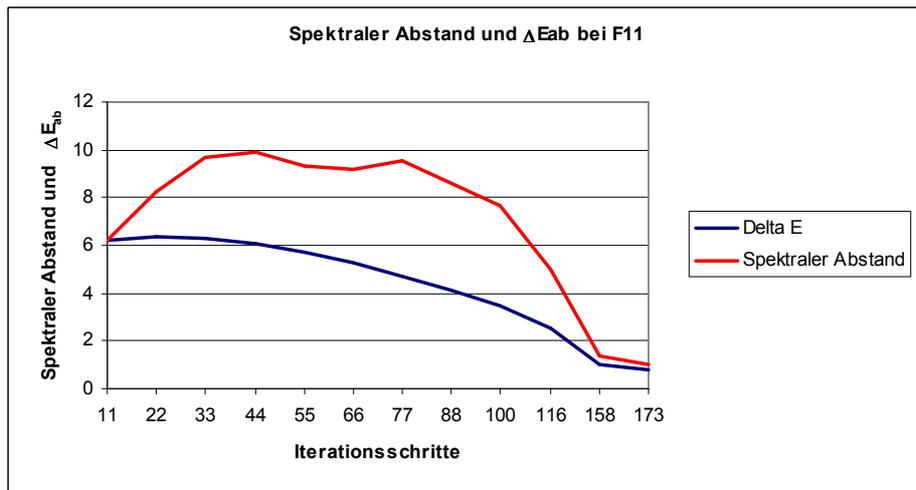


Abb. 9.

Literatur

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