

Spektrale Schätzung in Inline-Bildinspektionssystemen mittels 6-12 kanaliger CCD-Zeilensensoren

Bernhard Frei, Paritosh Prayagi (*), Markus Schnitzlein
Bernd Jödicke (**), Minti Kaur (**), Thomas Messmer (**)

Chromasens GmbH
Max-Stromeyer-Straße 116 , D-78467 Konstanz
eMail: Markus.Schnitzlein@chromasens.de
URL: <http://www.chromasens.de>

(*) Institut für Print- und Medientechnik an der TU Chemnitz
Reichenhainerstr.70, 09126 Chemnitz
eMail: Paritosh.Prayagi@chromasens.de
URL: <http://www.tu-chemnitz.de/mb/PrintMedienTech/>

(**) HTWG Konstanz (Hochschule für Technik, Wirtschaft und Gestaltung)
Brauneggerstr. 55, 78462 Konstanz
eMail: Joedicke@htwg-konstanz.de
URL: <http://www.htwg-konstanz.de>

Zusammenfassung: Die spektrale Messung von Farben (im speziellen Fall Druckfarben) in Inline-Inspektionssystemen wird immer wichtiger. Die Erfassung der spektralen Eigenschaften der Druckfarbe ergibt neue Möglichkeiten der automatisierten Maschinensteuerung und der verbesserten Sicherstellung der gewünschten Farbwiedergabe. Da spektrale Messsysteme eine vollflächige Erfassung von großformatigen Objekten nur mit erheblichen Aufwänden realisieren können, wurde bei der Fa. Chromasens GmbH ein spektrols Inline-Farbmesssystem entwickelt, das unter Verwendung von 6 –12 Filtern eine spektrale Schätzung des Spektrums der Druckfarbe mit einer Genauigkeit von $\Delta E < 1$ ermöglicht.

Die spektrale Schätzung nutzt dabei das POCS- Verfahren (Projection onto Convex Sets), das eine interaktive Näherung unter Einbringung von allgemeinem Vorwissen aus dem Druckprozess ermöglicht. Das Verfahren wurde mit Zeilenkameras und einer LED- Lichtquelle an zahlreichen Farbproben unterschiedlicher Farbhersteller erfolgreich getestet.

Der besondere Vorzug des Ansatzes besteht darin, dass die Auswahl und die spektrale Charakteristik der verwendeten Filter in großen Grenzen frei wählbar ist. Weiterhin ermöglicht dieses Verfahren spektrale Unterschiede der Detektion, die durch unterschiedliche Einfallswinkel des Lichtes auf den Sensor und die Farbfilter verursacht werden, zu korrigieren, sodass die Genauigkeit der spektralen Schätzung keiner unmittelbaren Abhängigkeit vom Abtastort mehr unterliegt.

Das Verfahren wurde auch mit anderen Verfahren (Wiener Schätzung, etc) verglichen. Die Ergebnisse werden dargestellt und diskutiert.

1 Einleitung

Unsere Gesellschaft bedient sich in immer größerem Maße neuer Kommunikationsmedien, die einen Austausch von bildhaften Informationen ermöglichen. Das „Bild“ als Informationsträger tritt in immer stärkerem Maße in den Vordergrund. Die Möglichkeit große Informationsmengen zu transportieren ist gegeben und entwickelt sich rasant weiter. Neben den gedruckten Medien werden mittlerweile vielfältige moderne Wiedergabemedien entwickelt, die mittels moderner Lichtquellen und unterschiedlicher Technologien (LED, Plasma, O-LED, etc.) bildhafte Informationen darstellen und mobil verfügbar machen. Die visuell wahrgenommene Information hat eine weit größere Bedeutung, als andere Wahrnehmungsformen. Dieser Trend wird durch zahlreiche technologische Entwicklungen im Bereich des Datentransfers, der Datenverarbeitung und Wiedergabemedien gestärkt. Auf der opto-sensorischen Seite wird dieser Trend durch immer höher auflösende Bildsensoren gestützt, die in Kamerasystemen zur Bildgewinnung eingesetzt werden.

Ein wesentlicher Aspekt bleibt bei der Bildgewinnung aber derzeit unberücksichtigt: Die spektrale Auflösung bleibt immer noch auf 3 Sensoren (Rot, Grün, Blau) beschränkt. Obwohl die erheblichen Beschränkungen bei der Farbdarstellung und der Farbmessung bei nur

3 Primärfarben bekannt sind, unterbleibt der technische Schritt hin zu mehrkanaligen Farbaufnahme- und Wiedergabesystemen, weil die technologische Hürde groß - und die Anpassung der vorhandenen Standards aufwändig erscheint.

Im wissenschaftlichen Bereich der spektralen Farbmessstechnik, wird von vorneherein mit mehrkanaligen Systemen (> 40 Kanäle) gearbeitet. Diese spektralen Messungen werden bislang aber vorwiegend punktförmig durchgeführt. Ortsaufgelöste spektrale Messungen sind bis dato nur mit kombinierten Kamerasystemen mit speziellen spektralen Filtersystemen möglich.

Filterradsysteme mit 6-16 Filter

RWTH Aachen	6 Filter
RIT (Rochester Institute of Technology)	6 Filter
VASARI National Gallery / University of Southampton	7-12 Filter
CRISATEL (EU-Projekt) Louvre, Lumiere Technology	13 Filter
University of Burgundy, Dijon	9 Filter
ColorAIXperts Aachen	16 Filter
TU Darmstadt	6 Filter

Spektrale Filterung mit LCTF (Liquid Crystal Tunable Filter)

École Nationale Supérieure des Télécommunications (ENST, Paris)
Osaka Electro-Communication University
Rochester Institute of Technology
Universität Siegen

Spektrale Trennung mittels Gitter oder LVF (Linear Variable Filter)

Saitma University (Linear Variable Filter)
University of Loughborough (Spectrometer)
University of Joensuu, Finnland
Technische Universität Chemnitz (Mikro Gitter Spiegel)

Die Entwicklung von spektral definierten mehrkanaligen Sensoren ist bislang nicht möglich, weil die etablierte Herstellung mittels Farbbeschichtungen auf Siliziumsubstraten bei weitem zu ungenau (toleranzbehaftet) ist und nur relativ breitbandige Filter ermöglicht.

Mit der Einführung von Sensoren, deren spektrale Empfindlichkeit deutlich genauer definiert und reproduziert werden kann, lassen sich mehrkanalige spektral selektive bildgebende Sensoren herstellen, welche eine spektral aufgelöste Erfassung der Vorlage ermöglichen und geringe Farbabweichungen wesentlich besser detektieren können.

Während die Nutzung dieser Technologie in einem Massenmarkt noch sicherlich einige Jahre benötigt, kann aber ein solches Verfahren heute schon dort eingesetzt werden, wo hochwertige Kamera- und Messsysteme für die Bildgewinnung und Farbmessung benötigt werden.

Allen diesen Applikationen ist gemeinsam, dass durch die Möglichkeit der Verwendung spektraler Sensoren, der Vorteil erzeugt wird, dass sich solche Farbinformationen auf jedes Wiedergabesystem verlustfrei übertragen lassen.

Als Applikationsfelder sind die folgenden Themen denkbar:

- Sicherheitstechnik Echtheitsprüfung, Plagiatuntersuchung
Wertpapiere, Reisedokumente, Fälschungen
- Materialsortierung verbesserte Messgenauigkeit der Farbwerte
Lebensmittel, Bewertung von Inhaltsstoffen, Pigmente
- Druckqualitätskontr. Qualitätssicherung, Soll/Ist - Vergleich
Spektrales Drucken, Inline-Druckqualitätskontrolle
- Produktionstechnik Farb-Optimierung, Leistungssteigerung
- Medizintechnik Farbfehlerfreie Bilddarstellung bei Ferndiagnosen, Telemedizin,
Optimierung des Bildkontrastes bei Operationen
- Medienunabh. Langzeitarchivierung: Bilder, Gemälde, Bücher mit spektraler
Genauigkeit
- E-Commerce Darstellung von Waren auf Monitor ist farbrichtig /farbneutral
Internetkauf mangelt an farbrichtiger Darstellung

2 Aufgabenstellung

Um eine Farbe ausreichend genau spektral zu beschreiben werden im allgemeinen Spektralphotometer eingesetzt, die mit einer hohen spektralen Auflösung die Remission einer Farbprobe detektieren. Die Auflösung der verwendeten Spektrometer hängt stark von der zu bearbeitenden Aufgabenstellung ab.

Für farbmetrische Aufgabenstellungen kommen hierbei Systeme mit einer spektralen Auflösung (nominaler Stützstellenabstand der Messung) zwischen 1nm und 10 nm zum Einsatz. Betrachtet man einen visuell relevanten Spektralbereich von 380nm – 730 nm oder auch oft 400nm – 750nm, so sind also mindestens 36 Stützstellen (im 10nm –Abstand) nötig, um die Spektralverteilung einer Farbe zu beschreiben.

Wenn man auf Basis dieses Wissens eine spektrale Vollflächenerfassung einer Oberfläche realisieren möchte (die heute bestenfalls als RGB-Bild angeboten wird), dann würde sich die notwendige Datenrate um den Faktor 12 erhöhen.

Die Fragestellung, wie die Genauigkeit der spektralen Messung von der Anzahl der verwendeten Bildkanäle verändert wurde bereits von zahlreichen Wissenschaftlern diskutiert und es wurden bereits zahlreiche Systeme konzipiert, um die vollflächige spektrale Erfassung von großen Objekten zu realisieren.

Hierbei wurden Verfahren diverse lineare Lösungsverfahren benutzt, um aus einem Satz von Messungen die ursprünglich vorliegende Farbe zu rekonstruieren.

Ansätze auf Basis der Eigenvektormethode, der Pseudoinversen oder der Wiener Schätzung sind hierbei oft verwendet worden. Das hier vorgestellte POCS-Verfahren (POCS= Projection onto Convex Sets) beruht auf einem iterativen Lösungsansatz und besitzt den wesentlichen Vorteil, dass hierbei grundlegende Eigenschaften (Vorwissen) der zu messenden Objekte innerhalb der Iterationsprozesse auf numerische Art eingebracht werden können.

Mit „grundlegenden Eigenschaften“ sind hierbei vor allem die folgenden Eigenschaften zu sehen:

- Positivität der Remissionsfunktion
- Begrenzte Steilheit
- Begrenzte Glattheit
- Beschränkte Modalität des spektralen Verlaufs

Diese Eigenschaften sind nur sehr schwer in die matrizenbasierten Lösungsansätze der oben genannten Verfahren einzubringen.

So stellt sich nun die folgende Frage:

Mit wie vielen Messungen (spektralen Auszügen) lässt sich – unter Berücksichtigung der Kenntnis von max. Steilheit, Glattheit und Positivität der vorliegenden Remissionsfunktion einer Festfarbe – eine Messgenauigkeit von $\Delta E < 1$ erreichen.

Als Testfarbensatz wurden die Farben von Huber und Sun Chemical, sowie die Farben des Color Checkers verwendet.

Auf dieser Kenntnis basierend wurde eine hochauflösende Zeilenkamera realisiert, die mit einer ausreichend großen Zahl an spektralen Kanälen arbeitet und eine schnelle spektrale Bilderfassung ermöglicht, die grundsätzlich für jeden Bildpunkt oder (aus Gründen des Signalrauschens) für das 10x10 Pixel große Feld eine spektrale Information liefert.

Die geometrische Auflösung dieser Kamera beträgt 300µm/Pixel und die minimale Detektionsfläche besitzt eine Größe von 3mm x 3mm.

3 Lösungsansatz

Die Remission einer Testfarbe, die von einer Lichtquelle mit einem Spektrum $b(\lambda)$ beleuchtet wird, soll mit einer CCD-Kamera mit N Kanälen, deren spektrale Grundempfindlichkeit durch $s(\lambda)$ gegeben ist, aufgenommen werden.

Die einzelnen Kanäle werden durch unterschiedliche optische Filter $g_k(\lambda)$ in ihrer spektralen Empfindlichkeit verändert.

Die spektrale Eigenschaft der Optik $o(\lambda)$ wird noch ausgeführt, obwohl sie grundsätzlich für alle Kanäle unverändert ist und somit mit der Sensorempfindlichkeit zusammengeführt werden könnte. Da oftmals jedoch die optischen Elemente eines Abbildungssystems starke winkelabhängige spektrale Effekte $o(\lambda, \alpha)$ aufweisen können, wird die spektrale Durchlassfunktion der Optik hier separat aufgeführt.

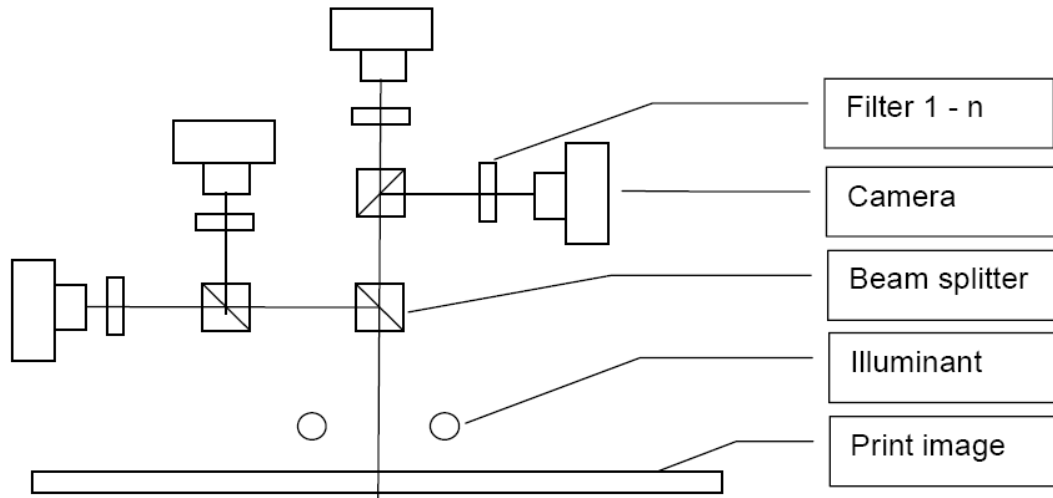


Abbildung 1: Schematischer Systemaufbau

Jede CCD-Kamera enthält tri-lineare RGB Sensoren, sodass mit einem derartigen Aufbau bis zu 12 unabhängige Bildkanäle realisiert werden können. Mit dem Vorsatzfilter vor der Kamera wird die spektrale Sensitivität des Sensors verändert. So entstehen bis zu 4 x 3 Bildkanäle.

Die spektralen Eigenschaften der diversen Komponenten sind in Form von diskreten Messwerten im Wellenlängenbereich von 380nm bis 730nm gegeben. Der Stützstellenabstand beträgt in allen Messungen 5nm. Wir gehen daher für die weiteren Darstellungen zur Summenschreibweise über

$$r_k = \sum_{w=0}^{50} c(\lambda_w) \cdot b(\lambda_w) \cdot o(\lambda_w) \cdot s(\lambda_w) \cdot g_k(\lambda_w) \Delta\lambda$$

$$\Delta\lambda = 5\text{nm} \quad , \quad \lambda = 380\text{nm} + w \cdot 5\text{nm} \quad \text{für} \quad 0 \leq w \leq 50 \quad , \quad \text{und} \quad k = 1, \dots, N$$

Mit $f_k(\lambda) = b(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot g_k(\lambda)$ führen wir die konstanten Größen $b(\lambda), o(\lambda), s(\lambda)$ mit der variablen Durchlassfunktion der Filter $g_k(\lambda)$ zusammen

Wir wollen nun versuchen die spektrale Remission der Probe $c(\lambda)$ als lineare Kombination der unterschiedlichen $f_k(\lambda)$ darstellen und auf diese Weise die Remission $c(\lambda)$ zu rekonstruieren.

Die Aufgabe lässt sich als Problem einer linearen Optimierung formulieren, wobei die Gewichte a_k so bestimmt werden sollen, dass Folgendes gilt:

$$\left[c(\lambda) - \sum_{k=1}^N a_k \cdot f_k(\lambda) \right] \rightarrow \min.$$

Als Lösungsmethode verwenden wir das POCS-Verfahren (Projection onto Convex Sets).

4 POCS-Verfahren zur linearen Optimierung

POCS-Verfahren (Projection onto Convex Sets) stellen eine weit verbreitete Klasse von Verfahren dar, welche in der Signalanalyse und insbesondere in der digitalen Bildverarbeitung¹ in Gebrauch sind, um ein Signal bzw. Bild aus entweder unvollständigen oder durch Rauschen gestörten Daten zu rekonstruieren.

Die iterative (alternierende) Projektion auf konvexe Sets ist eine leistungsstarke Methode zur Signal- und Bildrekonstruktion und Synthese. Die wünschenswerten Eigenschaften des rekonstruierten Signals können durch die Definition von konvexen Sets von Signalen, die selbst wiederum durch ein konvexes Set von Randbedingungsparametern beschrieben werden, bestimmt werden.

Die iterative Projektion auf diese konvexen Sets von Randbedingungen führt zu einem Signal mit allen gewünschten Eigenschaften.

Ein rekonstruiertes Signal wird, um als gültiges Ergebnis gelten zu können, bestimmten Plausibilitätsbedingungen genügen müssen, wobei sich die Bedingungen von Anwendung zu Anwendung unterscheiden werden.

Jede Bedingung, die man an das gesuchte Signal/Bild f stellt, definiert eine Menge - nämlich der Menge von Signalen, die genau diese Eigenschaft haben - und f liegt in dieser Menge. Hat man mehrere Nebenbedingungen gegeben, dann liegt das gesuchte Bild daher im Durchschnitt all dieser Mengen.

Ist es möglich, in einem passenden Hilbertraum die Nebenbedingungen so zu formulieren, dass die dadurch definierten Mengen konvex und abgeschlossen sind, und daher die Projektion auf diese Mengen wohldefiniert ist, kann man wie folgt vorgehen: Ausgehend von einem beliebig gewählten Startwert projiziert man den Startwert auf die erste Menge. Den sich daraus ergebenden Wert projiziert man auf die zweite Menge und fährt so fort. Hat man alle Mengen ausgeschöpft, so projiziert man den letzten Wert wieder auf die erste Menge. Das Verfahren endet, wenn entweder die gewünschte Genauigkeit erreicht ist, oder sich der Wert nicht mehr ändert.

Geometrische Interpretation:

In Abbildung 2 ist die Projektion auf eine konvexe Menge (Set) dargestellt.

Zu einem gegebenen Vektor $\vec{v} \notin A$ existiert ein einziger Vektor $\vec{i} \in A$, so dass der Abstand zwischen $\vec{i}$ und $\vec{v}$ minimal wird. Wenn $\vec{v} \in A$, dann ist die Projektion auf A gleich $\vec{v}$.

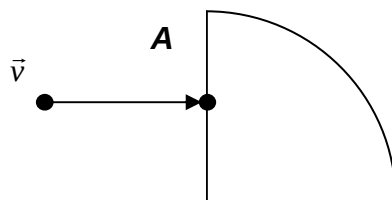


Abbildung 2: Das Set A ist konvex. Die Projektion von $\vec{v}$ auf A ergibt das einzige Element von A mit dem geringsten Abstand zu $\vec{v}$.

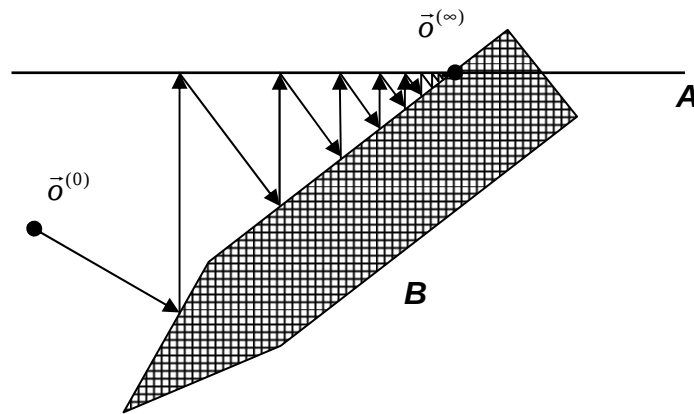


Abbildung 3: Alternierende Projektionen zwischen zwei oder mehr konvexen Sets mit einer nichtleeren Schnittmenge führen zu einer Konvergenz auf einen bestimmten Punkt der Schnittmenge. Im dargestellten Fall sind die Sets A (Liniensegment) und B konvex.

Starten wir die Iteration bei $\vec{o}^{(0)}$ führt das zu einer Konvergenz auf $\vec{o}^{(\infty)} \in A \cap B$.

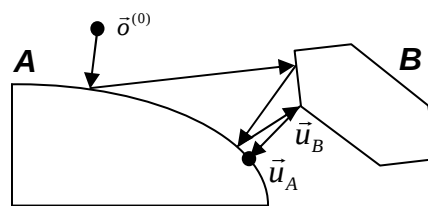


Abbildung 4 zeigt die Situation, wenn sich die Mengen nicht schneiden. In diesem Fall gibt es keine Lösung, jedoch pendeln die Lösungen im Endzustand im Bereich des Minimalabstandes.

Es gibt drei besondere Eigenschaften der POCS. Sie alle hängen davon ab, wie sich die unterschiedlichen konvexen Sets miteinander schneiden.

1. Sind zwei oder mehr konvexe Sets mit nichtleerer Schnittmenge gegeben, dann konvergieren die POCS zu einem Punkt dieser Schnittmenge (siehe Abbildung 3).
2. Existiert eine leere Schnittmenge zwischen zwei konvexen Sets, so konvergieren die POCS auf zwei Punkte (jeweils ein Punkt jedes Sets), die den geringsten Abstand aufweisen.
3. Falls drei oder mehr konvexe Sets keine gemeinsame Schnittmenge besitzen, haben die POCS keine relevante Bedeutung

5 Iterationsverlauf

Als Startpunkt für die Iteration wählen wir eine erste Schätzung der spektralen Verteilung $c(\lambda)$ auf der Basis der Signalwerte der einzelnen Sensoren und der Kenntnis, deren spektralen Charakteristik.

$$r_k = \int_{\Lambda} b(\lambda) \cdot c(\lambda) \cdot o(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot f_k(\lambda) d\lambda$$

Eine erste Schätzung (mit in Klammern gesetztem Hochindex) wird gebildet mit:

$$c^{(0)}(\lambda) = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{f_k(\lambda) \cdot r_k}{\int_{\Lambda} f_k(\lambda) d\lambda}}{\sum_{l=1}^N f_l(\lambda)}$$

In numerischer Summenschreibweise (so wurde es auch programmiert):

$$C_w^{(0)} = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{f_{k_w} \cdot r_k}{\sum_{k_w} f_{k_w}}}{\sum_{k=1}^N f_{k_w}}$$

Die erste Schätzung wird somit gebildet als Summe über alle Filterfunktionen $f_k(\lambda)$ multipliziert mit dem Sensorsignal desselben Kanals r_k - normiert auf das „Gewicht“ dieses Kanals (gemeint ist die numerisch integrierte Fläche unter der Kurve von $f_k(\lambda)$ mit den Stützstellen f_{k_w}). Dieses Ergebnis wird nochmals normiert auf die summierten Beiträge der Filterfunktionen $f_k(\lambda)$ an der jeweiligen Stützstelle f_{k_w} .

Die somit gefundene 0. Näherung zeigt bereits den charakteristischen Verlauf der gesuchten spektralen Verteilung $c(\lambda)$.

Durch die Anwendung der Iterationsverfahrens mit dem Startwert $c^{(0)}(\lambda)$, mit der beschriebenen Methodik erfolgen nun zahlreiche Iterationen, die bei jedem Iterationsschritt den Abstand zwischen der aktuellen Schätzfunktion $c^{(i)}(\lambda)$ und der Zielfunktion $c(\lambda)$ streng monoton verringern. Der Abstand der Funktion $c(\lambda)$ und $c^{(i)}(\lambda)$ ist definiert als $\Gamma = \sum_w (c_w - c_w^{(i)})^2$.

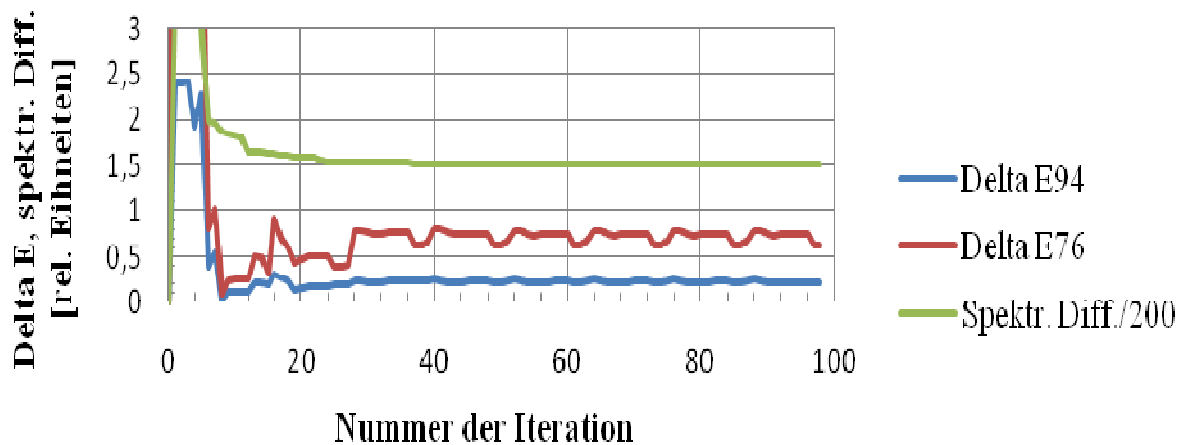
Die Forderung nach $\Gamma \rightarrow \min$ wird erfüllt durch die Iterationsregel:

$$c^{(i+1)}(\lambda) = c^{(i)}(\lambda) - \frac{\langle c^{(i)}(\lambda), f_k(\lambda) \rangle - r_k}{\|f_k(\lambda)\|^2} f_k(\lambda)$$

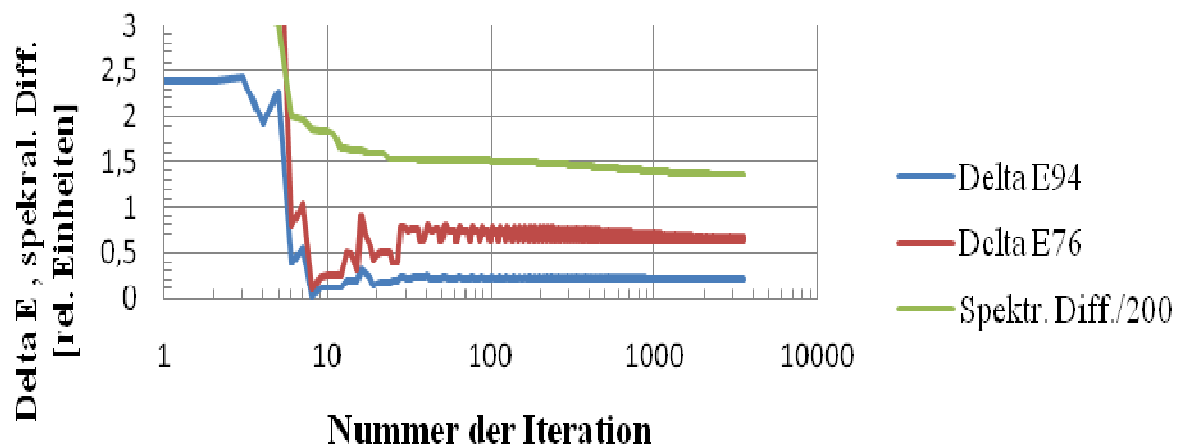
Mit
$$\langle c^{(i)}(\lambda), f_k(\lambda) \rangle = \sum_w c_w^{(i)} \cdot f_{k_w}$$

und
$$\|f_k(\lambda)\|^2 = \langle f_k(\lambda), f_k(\lambda) \rangle = \sum_w f_{k_w} \cdot f_{k_w}$$

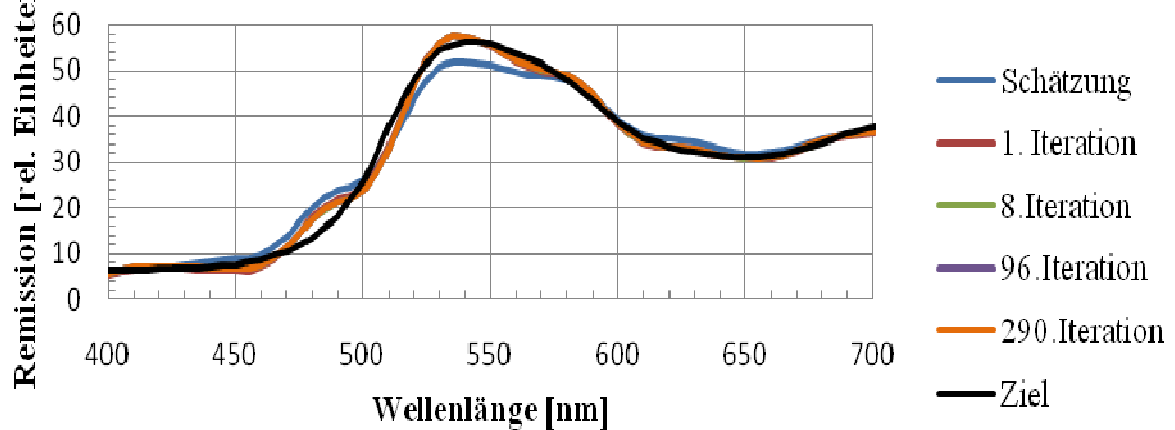
ΔE und spektr. Diff. im Verlauf der ersten 96 Iterationen

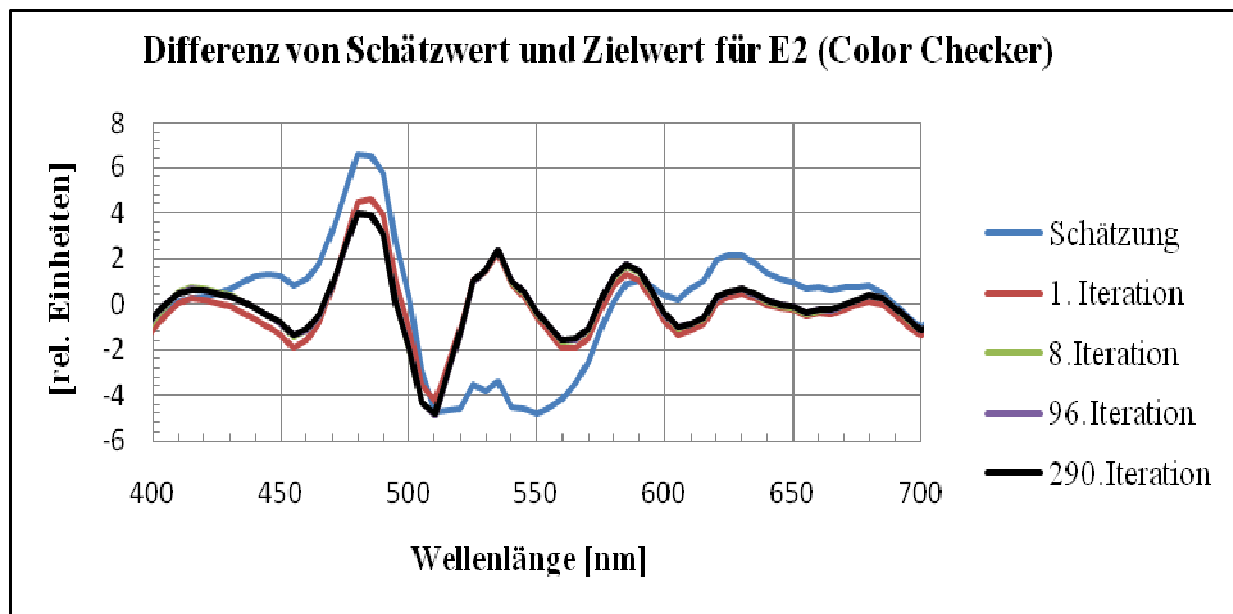


ΔE und spektr. Diff. im Verlauf der ersten 3480 Iterationen



Geschätzter Remissionsverlauf für Farbe E2 (Color Checker)



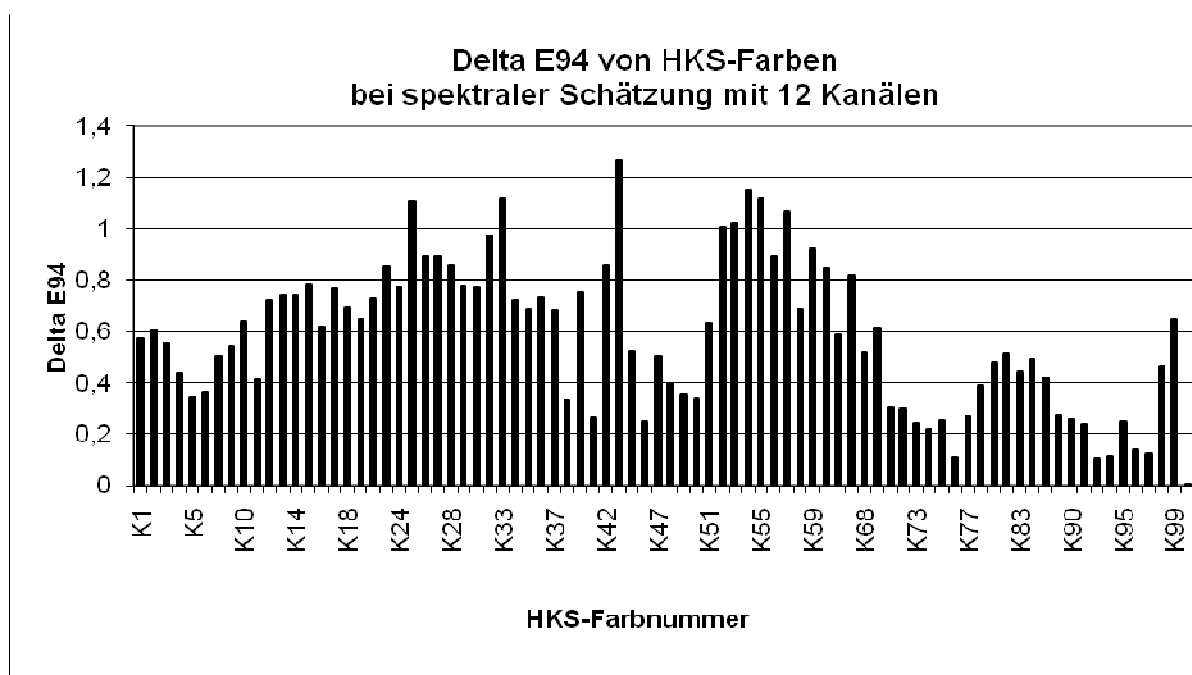


Die Iterationsprozedur läuft über die k Filter und beginnt dann wieder von neuem. Innerhalb der Iterationszyklen ergibt sich die Möglichkeit die Forderungen nach

- Positivität der Remissionsfunktion
- Begrenzte Steilheit
- Begrenzte Glattheit
- Beschränkte Modalität des spektralen Verlaufs

In Form von Zwischenschritten einzubringen, indem die i -te Näherung gemäß den oben genannten Forderungen modifiziert wird.

Da das Iterationsverfahren relativ langsam reagiert bleiben die eingepprägten Eigenschaften über viele Zyklen erhalten und führen zu einem Ergebnis, das die gewünschten Eigenschaften weitgehend enthält.



6 Wahl der Filterfunktionen

Der Einfluss der Auswahl des primären Filtersets hat auf die gefundenen Nährungswerte für die spektrale Rekonstruktion der Probenfarbe ist in weiten Grenzen gering.

So wurden die gezeigten Messungen, sowohl mit einem „Idealfiltersatz“ (äquidistante Mittelwellenlängen, unimodale Transmissionscharakteristik, etc

7 Ergebnis und Zusammenfassung

Es konnte anhand von Versuchen und Simulationen gezeigt werden, dass auf der Basis eines 12 kanaligen CCD-Kamerasystems unabhängig von der präzisen Auswahl der Filtereigenschaften sehr gut spektrale Schätzungen möglich sind, die auf typischen Druckfarben zu Delta E-Werten führen, die im Bereich von Delta E = 1 liegen.

Es entstand in Zusammenarbeit mit der HTWG Konstanz und der TU Chemnitz ein umfassendes Simulationstool und ein Kameramessplatz, der eine spektrale Charakterisierung der Sensoren (Bildkanäle) ermöglicht.

Die Kamera ermöglicht eine Datenrate von 100 MPix/s mit 12*14 Bit zu erzeugen.

8 Literatur

- Hardeberg, F. Schmitt, H. Brettel; Multispectral color image capture using a liquid crystal tunable filter; (2002) Optical Engineering; Vol. 41, Nr. 10, S. 2532-2548 <http://www.tsi.enst.fr/>
- Hardeberg, J. (2001) Acquisition and Reproduction of Color Images, www.dissertation.com/library/112135a.htm ISBN 1-58112-135-0
- Hardeberg, J.Y., Schmitt, F., Brettel, H., Maitre, H., Multispectral Imaging in Multimedia, Proc. CIM'98 Colour Imaging in Multimedia, University of Derby, 75-86 (1998)
- Stark, H. (1998) Vector Space Projections, John Wiley&Sons, ISBN 0-471-24140-7
- Stark, H. (1998), Vector Space Projektions – a numerical approach, John Wiley & Sons
- Hill; "The History of Multispectral Imaging at Aachen University of Technology", (2003) online publ. www.multispectral.org <http://www.ite.rwth-aachen.de/>
- Hill, B., (R)evolution of Color Imaging Systems, Proc. 1st European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision CGIV 2002
- F. Imai, M. Rosen, R. Berns; Comparative Study of Metrics for Spectral Match Quality; Proceedings of First European Conference on Colour in Graphics, Imaging and Vision; S. 492-496 2002, Poitiers, Frankreich <http://www.cis.rit.edu/mcsl/>
- Cotte, P., Dupouy, M.; CRISATEL High Resolution Multispectral System; (2003) Proceedings of the PICS Conference; S. 161-165; Rochester, N.Y. <http://www.crisatel.jussieu.fr;>

- M. Flaspöhler, A. Willert, A. Hübler; (2004), Optical and colorimetric Characterization of a Micro Mirror Based Spectral Image Capturing System; Proceedings of the CGIV 2004 Conference; S. 213-217; April 2004, Aachen, Deutschland <http://www.tu-chemnitz.de/mb/PrintMedienTech/>
- Laamanen, H., Jaaskelainen, T., Hauta-Kasari, M., Parkinen, J., Miyata, K.; (2004) Imaging Spectrograph Based Spectral Imaging System; Proceedings of the CGIV 2004 Conference; S. 427-430; April 2004, Aachen, Deutschland <http://ifc.joensuu.fi/>