

Mehrkanalprojektion: Vorteile und Realisierungskonzept eines multispektralen Sechskanaldisplays

Thomas Boosmann

Bernhard Hill

*Institut für Technische Elektronik
RWTH Aachen*

Templergraben 55, 52056 Aachen

e-Mail: boosmann@ite.rwth-aachen.de, hill@ite.rwth-aachen.de

url: www.ite.rwth-aachen.de

Kurzfassung

In den letzten Jahren ist es durch neue Entwicklungen ermöglicht worden, Bildvorlagen multispektral aufzunehmen. Diese Aufnahmen gestatten eine präzise Verarbeitung und Rekonstruktion der Vorlage auch unter Einbeziehung verschiedener Beleuchtungsgegebenheiten. Die Wiedergabe erfolgt bislang auf Bildschirmen in der konventionellen Dreibereichstechnik oder in Form von Drucken. In diesem Artikel wird die multispektrale Bildwiedergabe mit Hilfe eines Sechskanaldisplays beschrieben, sowie auf die Realisierung und die praktischen Probleme des experimentellen Aufbaus eingegangen.

1 Multispektrale Bildverarbeitung

Die multispektrale Bildverarbeitung hat in den vergangenen Jahren erhebliche Fortschritte gemacht. Sie setzt sich grundsätzlich aus den Schritten spektrale Aufnahme, Codierung, Übertragung, Decodierung und Wiedergabe der Daten zusammen.

1.1 Aufnahme

Ein aufzunehmendes Objekt wird mit einer Lichtquelle beleuchtet. Die reflektierten Lichtstrahlen werden mit Hilfe eines Filtrerrades (bestückt mit Interferenzfiltern) in schmale Wellenlängenbänder aufgeteilt, die mit einem monochromatischen CCD-Sensor über die Fläche abgetastet werden. Damit ergeben sich genau so viele spektral schmalbandige Farbauszüge, wie sich Filter im Filtrerrad befinden.

Bei dem Aufnahmesystem sind ferner die spektralen Emissionseigenschaften der Lichtquelle, die Transmissionseigenschaften der Kanalfilter und die spektrale Aufnahmeempfindlichkeit des CCD-Sensors, sowie die spektrale Remission einer Weißfläche bekannt. Diese Kenntnis der Komponenten des Aufnahmesystems ist eine Voraussetzung für die Rekonstruktionsinformationen, die mit in die Codierung und Decodierung der Abtastdaten einer Aufnahme einfließen.

1.2 Codierung / Decodierung

Für die Codierung multispektraler Bilddaten besteht grundsätzlich die Möglichkeit verschiedene Codierungsverfahren einzusetzen. Eine Variation ist die Codierung der Bilddaten mit Hilfe von Basisvektoren, die es ermöglichen, in den ersten drei Kanälen Basisvektoren zu verwenden, die mit den verwendeten Primärvalenzen herkömmlicher Dateiformate übereinstimmen [6,7,14]. Auf diese Weise ist es möglich, den Übergang zu einer multispektralen Bildverarbeitung zu erleichtern, da die bislang

verwendete Software für die Verarbeitung von drei Farbkanälen weiterhin ohne Einschränkung verwendet werden kann, sich aber zusätzlich die erweiterten Möglichkeiten der multispektralen Bildverarbeitung eröffnen.

Bei der Decodierung lassen sich die spektralen Remissionseigenschaften des Objekts in ausreichender Genauigkeit rekonstruieren. Die Genauigkeit der Rekonstruktion hängt von der Anzahl der Abtastkanäle ab. Eine ausreichend große Anzahl von Abtastungen ist mit 16 gegeben, dadurch werden Farbwiedergabeunterschiede erreicht, die vom menschlichen Auge nicht mehr wahrgenommen werden [6].

1.3 Bilddatenübertragung

Für die Übertragung ist es notwendig ein standardisiertes Datenformat zu finden, damit sich keine geschlossene Systemarchitektur ergibt, sondern die multispektralen Bilddaten offen austauschbar sind, äquivalent zu den jetzt üblichen Dreikanalformaten.

Bei der Codierung der Bilddaten ergibt sich die Möglichkeit die einzelnen Komponenten entsprechend ihrer Relevanz bezüglich der menschlichen Sensibilität zu gewichten. Hierdurch wird eine Datenreduktion erzielt. Die notwendige Datenmenge für eine multispektrale Aufnahme kann somit auf das absolut notwendige Maß beschränkt werden und beträgt letztendlich nicht sehr viel mehr als dieses für eine unkomprimierte Dreikanalaufnahme notwendig wäre. Komprimiert ist eine solche Datei nur 1,5 fach größer. Im unkomprimierten Fall für natürliche Lichtarten beträgt der Faktor auch nur 2,33 [6].

1.4 Wiedergabe

Für die Wiedergabe der Bilddaten stehen die spektralen Informationen eines jeden Bildpunktes zur Verfügung. Diese werden aus der multispektralen Abtastung gewonnen. Dabei ist es möglich verschiedene Ansätze bei der Wiedergabe zu verfolgen. Die Rekonstruktion kann sowohl mit einer konventionellen Wiedergabetechnik, als auch multispektral erfolgen. Neben der multispektralen Reproduktion profitiert aber auch die konventionelle von einer multispektralen Bildaufnahme. Allerdings ermöglicht erst die multispektrale Reproduktion das Potential dieser Technologie völlig auszuschöpfen.

1.5 Stand der Technik

Die Entwicklung der letzten Jahre hat dazu geführt, daß mittlerweile kommerziell einsetzbare multispektrale Kamerasysteme verfügbar sind, die eine Auflösung bis zu 3000 mal 2000 Pixel besitzen [13]. Der Farbfehler dieser Systeme ist sehr gering, er beträgt im Mittel ca. 0,3 CIE ΔE_{94} und maximal nur ca. 0,8 CIE ΔE_{94} -Einheiten. Der Farbfehler ist damit geringer als die Wahrnehmungsschwelle bei der Betrachtung von komplexen Bildern. Das verwendete Kamerasystem tastet mit Hilfe von 16 spektral schmalbandigen Aufnahmen den Farbreiz ab und rekonstruiert ihn über Schätzverfahren mit hoher Genauigkeit. Die Wiedergabe multispektraler Farbinformationen erfolgt bislang konventionell auf Dreibereichsbildschirmen oder in Druckverfahren mit bis zu 6 Farben, wobei zwei dieser Farben aufgehellte Versionen der anderen sind. Die Reproduktion aus spektralen Farbreizdaten ermöglicht auf herkömmlichen Bildschirmen schon einige Verbesserungen, wie z.B. eine exakte Einrechnung verschiedene Wiedergabelichtarten, jedoch sind die Vorteile nicht vollends ausschöpfbar. Zum einen steht nur ein relativ begrenzter Farbraum zur Verfügung, so daß eine

nicht zu vernachlässigende Zahl von Farben nicht dargestellt werden kann und per Gamutmapping abgebildet werden muß. Zum anderen führt das Vorhandensein von nur drei Primärvalenzen zu deutlich wahrnehmbaren Metamerieeffekten, bei der die Farben zwischen Original und Reproduktion für verschiedene Beobachter unterschiedlich dargestellt werden müßten.

2 Vorteile multispektraler Bildverarbeitung

Die Vorteile der multispektralen Bildverarbeitung lassen sich am besten mit der Betrachtung der erstrebten Ziele verdeutlichen, auch wenn die derzeitigen Systeme aufgrund des vertretbaren Aufwandes nur einen, wenn auch nicht unerheblichen Teil dieses Zieles verwirklichen.

Anvisiert ist es, ein System zu schaffen, daß alle Farben exakt, d.h. mit von menschlichen Beobachtern nicht wahrnehmbaren Farbfehlern reproduzieren kann, unabhängig vom menschlichen Beobachter und der Beleuchtungssituation. Jedem dieser Teilziele wird durch den Einsatz von schmalbandigen Kanälen entsprochen. Dem erhöhten Aufwand gegenüber konventionellen Techniken wird durch die gewonnenen, verbesserten Ergebnisse Rechnung getragen. Im Falle des Gedankenspiels der vollständigen Rekonstruktion müßte die Anzahl der Wiedergabekanäle gegen unendlich, die korrespondierende Bandbreite gegen null streben. Somit ließen sich alle denkbaren Spektren von Lichtquellen in die Wiedergabe einrechnen, sofern ihre spektrale Zusammensetzung bekannt ist. Durch die vollkommene Reproduktion sind auch keinerlei Metamerieeffekte zwischen Original und Reproduktion erkennbar. Dieses führt dazu, daß jeder Beobachter, unabhängig von den spektralen Empfindlichkeiten keine Unterscheidungsmöglichkeiten mehr zwischen der Originalvorlage und der Reproduktion besitzt. Dieses Optimum ist jedoch nicht realisierbar, aber auch nicht notwendig, da das visuelle System des Menschen eine begrenzte Auflösung für Lichtwellenlängen besitzt. Ein solches Gedankenspiel macht dennoch deutlich, daß es zu einer Minimierung der Beobachtermetamerie kommt, wenn die Kanalanzahl passend vergrößert wird, auch wenn das Originalspektrum einer Farbe noch unterabgetastet dargestellt wird. Untersuchungen (siehe Abb. 6 und 7) zeigen, daß eine sechskanalige Reproduktion im Vergleich zu drei Kanälen zu einer deutlichen Reduzierung der Metamerie führt. Eine weitere Vergrößerung der Anzahl der Wiedergabekanäle ist bis ca. 9 noch sinnvoll und führt zu Werten, die im Maximum 0,5 CIE ΔE_{94} nicht übersteigen.

Für die Optimierung der wiedergegebenen Farben stehen bei einem mehr als drei Kanäle besitzenden Wiedergabesystem mehrere Herangehensweisen zu Verfügung, da es sich hier um ein überbestimmtes System handelt. Es ist möglich die Wiedergabe für eine größere Anzahl von Beobachtern zu optimieren.

Zusätzlich zu diesem Effekt ergeben sich durch die geringeren Bandbreiten der Kanäle Primärvalenzen mit starker Farbsättigung. Hierdurch ist eine deutliche Vergrößerung des darstellbaren Farbraumes zu erreichen. Nahezu alle natürlichen Farben können so wiedergegeben werden. Selbst der Raum aller möglichen Farben ist nur unwesentlich größer als der von einem solchen System abgedeckte Farbraum.

Das letzte, aber nicht minder wichtige Ziel ist die Wiedergabe der Bilddaten unter Einbeziehung verschiedener Lichtarten, mit denen die Vorlage beleuchtet werden kann. Dieses ist jedoch ohne allzu große Schwierigkeiten möglich, wenn die spektrale Verteilung der Lichtquelle vorliegt, mit der das Original beleuchtet wird und zum anderen die Bilddaten ebenfalls in einer spektral repräsentierten Form zur Verfügung stehen.

3 Anwendungsmöglichkeiten

Für den Einsatz eines solchen multispektralen Systems lassen sich eine Vielzahl von Möglichkeiten finden. Vor allem natürlich diejenigen, die sowohl einen großen darstellbaren Farbraum, als auch eine sehr hohe Verbindlichkeit bei der Reproduktion von Farben benötigen. Verwirklicht ist die Verwendung in der Textilindustrie [16], die Archivierung von Kunstwerken oder der Einsatz für medizinische Anwendungen, um nur einige zu nennen. Weitere sind denkbar. Es ist jedoch davon auszugehen, daß es zuerst nur ein sehr spezieller Kreis von Benutzern sein dürfte, der hiervon profitieren wird, bevor sich in der weiteren Entwicklung die Verbreitung nennenswert vergrößern dürfte.

4 Multispektrales Bildreproduktionssystem

Die praktische Ausführung einer ersten Version eines sechskanaligen Multispektraldisplays verwendet zwei LCD-Projektoren, deren ursprüngliche RGB-Kanäle durch je 3 zusätzliche dichroitische Filter in jeweils einen lang- und einen kurzwelligen Anteil

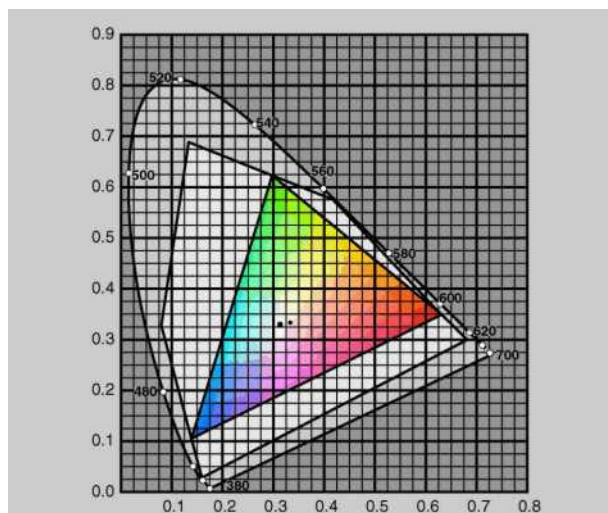


Abb. 1: xy-Normfarbt.: orig. Projektor (Dreieck), Farbraum des Multispektraldisplays (Polygon)

gesplittet werden. Damit ergeben sich sechs Farbkanäle mit einer Bandbreite von ca. 50 nm, die das visuelle Spektrum von ca. 380 bis 720 nm abdecken. Es wird durch diese Veränderung eine Verdopplung der Primärvalenzen erreicht, die es ermöglichen nahezu jede natürlich vorkommende Farbe zu reproduzieren.

Für die Wiedergabe besteht die Möglichkeit beliebige Beleuchtungsbedingungen der Originalvorlage zu simulieren, da die Ausgangsdaten spektral vorliegen. Diese Ausgangsdaten sind mit Hilfe einer Multispektralkamera aufgenommen worden, die eine solche spektrale Auflösung zur Verfügung stellen kann.

Die Charakteristik der realisierbaren Kanäle (Abb. 3) weicht von den gewünschten Spektralverteilungen idealer Multispektralkanäle (Abb. 2) ab. Dieses ist auf die notwendigerweise in den Projektoren verwendeten Lampen zurückzuführen, die stellenweise starke, schmalbandige Peaks aufweisen.

Für eine Bestimmung der Ansteuerung bzw. der Wiedergabe von Farben stehen unterschiedliche Methoden zur Ermittlung der einzelnen Kanalbeiträge zur Verfügung. Die erste Variante ist die lineare Abbildung über eine optimierte, lineare Matrix. Dieses kann sowohl über einen dreidimensionalen Farbwissenraum, als auch direkt aus den spektralen Abtastwerten geschehen. Bei einem System mit mehr als drei Primärvalenzen stehen jedoch mehrere Ansteuermöglichkeiten zur Auswahl. Der Beitrag eines Kanals zur Farbmischung kann durch unterschiedliche Intensitäten anderer

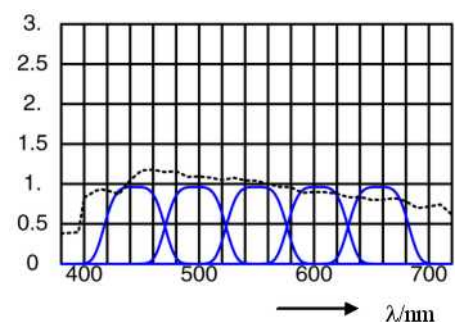


Abb. 2: idealisierte Kanäle der Multispektralprojektion

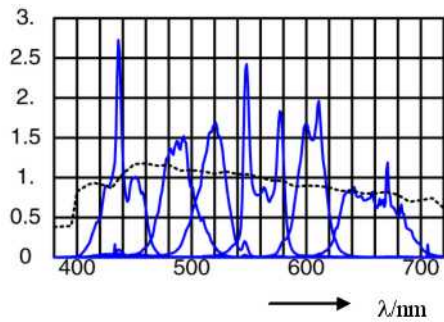


Abb. 3: reale Kanäle der Multi-spektralprojektion

natürlicher Farben zur Bestimmung der Farbumsetzung, diese wurden dem Datensatz von Vrhel [2] entnommen. Als Ausgangspunkt jeder dieser Optimierungen dienen die Spektraldaten einer wiederzugebenden Farbe. Zu Beginn der Optimierung wird ein geschätzter Startvektor verwendet, der die Wiedergabekanäle der Projektion ansteuert. Über das Wiedergabespektrum lässt sich anschließend der Farbfehler zwischen Original und Reproduktion berechnen. Iterativ wird anschließend eine verbesserte Darstellung gesucht, die unter vorgegebenen Randbedingungen optimiert ist. Simulationen des Wiedergabesystems mit den realisierten Strahlungsverteilungen lassen auf einen maximalen Reproduktionsfehler von 1,8 CIE ΔE_{94} schließen, Kennlinienprobleme und Leuchtdichteinhomogenitäten über der Bildfläche sind dabei noch nicht berücksichtigt.

Kanäle substituiert werden.

Deshalb ist ein statistisch optimiertes Verfahren vorzuziehen, bei dem die Berücksichtigung unterschiedlicher Optimierungsgesichtspunkte mit in die Lösung des überbestimmten Gleichungssystems einfließen kann. Hierfür wurden die Empfindlichkeitskurven von 24 Beobachtern ausgewählt, die aus den Datensätzen von Judd, Stiles und Burch [1] stammen. Berücksichtigt wurden diejenigen Beobachter, die die größtmöglichen Streuungen über das Wellenlängenspektrum aufwiesen.

Ferner dienten repräsentative Remissionsspektren

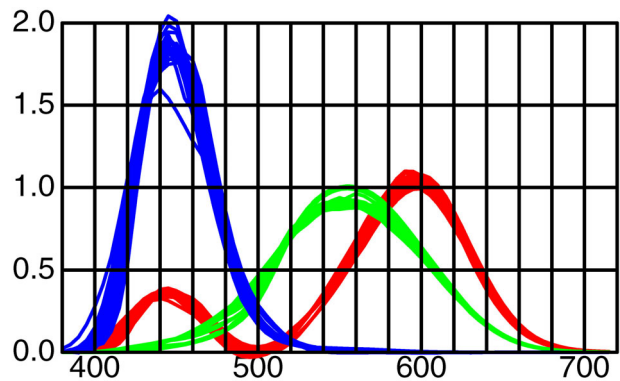


Abb. 4: Empfindlichkeitskurven von 24 Beobachtern

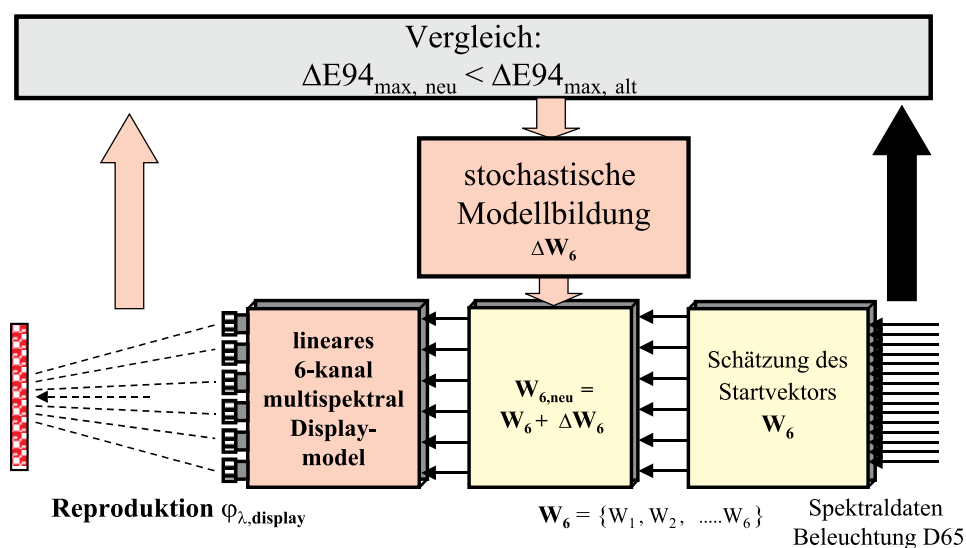


Abb. 5: stochastische Ansteuerwertgewinnung

Für die Minimierung der Beobachtermetamerie stehen wiederum mehrere Qualitätsindikatoren zur Auswahl. Die beiden offensichtlichsten Optimierungsgesichtspunkte

sind die Minimierung des mittleren bzw. die des maximalen Farbfehlers. In den vorgenommenen Untersuchungen wurden diese beiden Verfahren berücksichtigt. Es zeigte sich, daß bei einer Optimierung des mittleren Farbfehlers deutlich kleinere Farbfehler erreicht werden können als bei der Optimierung des maximalen Fehlers (0,492 zu 0,734 CIE ΔE_{94}).

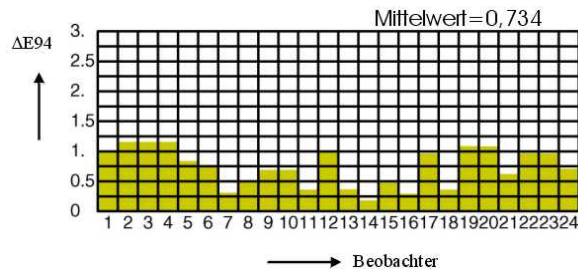


Abb. 6: Fehlerverteilung von 24 Beobachtern bei Optimierung auf maximalen Fehler für die Weißwiedergabe

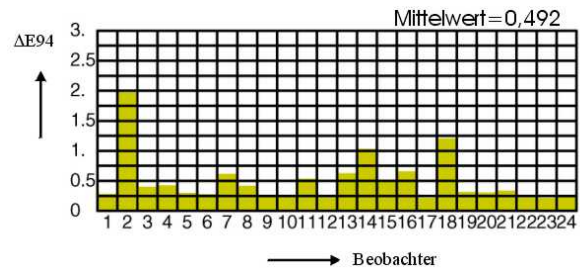


Abb. 7: Fehlerverteilung von 24 Beobachtern bei Optimierung auf mittleren Fehler für die Weißwiedergabe

Bei der Minimierung des mittleren Farbfehlers treten aber bei verschiedenen Anfangswerten für die Optimierung immer wieder Beobachter auf, deren maximaler Fehler deutlich über denen der anderen Beobachter liegt (Abb. 7). Es ist jedoch erstrebenswert für möglichst alle Beobachter die Farbfehler zu minimieren, deshalb ist die Optimierung anhand der maximalen Farbfehler denen der mittleren Farbfehler vorzuziehen. Dieses ist vor allem der Fall, wenn die Fehler insgesamt im akzeptablen Bereich verbleiben.

Damit die Qualität der Bildreproduktion bewertet werden kann, wurden die simulierten Ergebnisse mit den Meßwerten des realisierten Sechskanaldisplays verglichen. Untersucht wurde hierbei der Farbfehler in Abhängigkeit von der Kanalanzahl der theoretischen Kanäle. Sie stellen somit einen Anhaltspunkt für die Fehlergrenze der realisierbaren Kanäle dar. Unterschieden wurde hierbei zwischen drei Arten von Fehlern: dem maximalen, dem durchschnittlichen und dem Fehler, der aus dem einen Prozent der größten Fehler gemittelt wird.

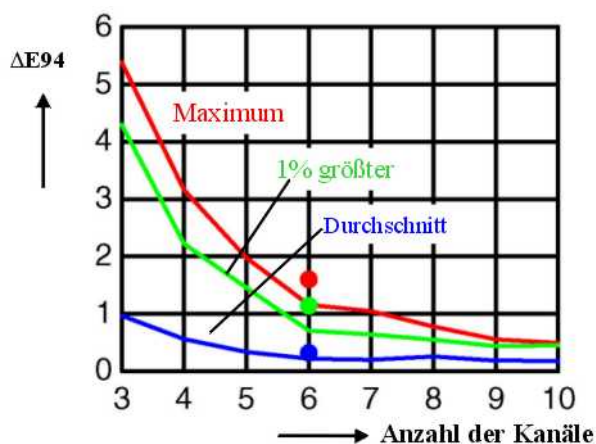


Abb. 8: Fehler bei Farben innerhalb des darstellbaren Farbenraumes des Displays

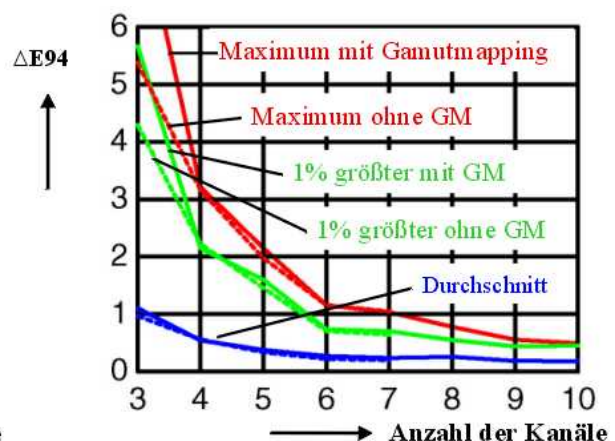


Abb. 9: Fehler bei Farben inner- und außerhalb des darstellbaren Farbenraumes des Displays

Als Ausgangspunkt der Untersuchungen dienten zunächst Farben, die innerhalb des darstellbaren Farbenraums liegen (Abb. 8). Deutlich zu erkennen ist, daß der Farbfehler bis zu 6 Farbkanälen deutlich abfällt, sich dann jedoch mit einem viel schwächeren Absinken zu höheren Kanalzahlen fortsetzt. Die Punkte in den Diagrammen kennzeichnen die simulierten Wiedergabefehler des realisierten Sechskanaldisplays,

der in der Mitte der Projektionsfläche gemessen wurde. Zu erkennen ist, daß die realisierten Wiedergabefehler über denen der theoretisch anstrebenswerten Kanäle liegen. Diese werden jedoch nicht allzu stark übertroffen und der mittlere Farbfehler liegt deutlich unterhalb von 1 CIE ΔE_{94} .

Bei einer weiteren Untersuchung kommen auch diejenigen Farben in Betracht, die außerhalb des darstellbaren Farbenraums liegen (Abb. 9). Diese werden durch die durchgezogenen Linien im Diagramm repräsentiert. Zum besseren Vergleich sind mit den gestrichelten Linien die Ergebnisse aus der vorigen Untersuchung, bei der alle Farben innerhalb des Farbkörpers lagen, zusätzlich in das Diagramm eingezeichnet.

5 Zusammenfassung

Für ein vollständiges multispektrales Bildverarbeitungssystem ist ein Multispektraldisplay mit sechs Primärvalenzen realisiert worden. Hierzu werden zwei LCD-Projektoren mit modifizierten Kanälen eingesetzt. Dieses System ermöglicht die Wiedergabe nahezu aller natürlichen Farben mit einem Farbfehler, der kleiner ist als der, welcher in komplexen Bildern von einem Betrachter unterschieden werden kann. Die erzielten Ergebnisse liegen unwesentlich oberhalb der Grenze, die durch Multispektralwiedergabekanäle mit theoretisch vorgegebenen Spektralverläufen gegeben ist. Als größtes Hemmnis für die Realisierung verbesserter Resultate bei der Farbwiedergabe stellen sich die Spektren der zur Wiedergabe eingesetzten Lampen heraus, die in den LCD-Projektoren verwendet werden.

Für eine optimalere Farbwiedergabe der Projektionsvorrichtung wird an einer Homogenitätskorrektur über jeden einzelnen Farbkanal gearbeitet. Desweiteren bewirkt die Verwendung zweier Projektoren mit jeweils einer Lichtquelle eine Helligkeitsdrift der Projektionskanäle untereinander und eine unterschiedliche Konvergenz der einzelnen Teilbilder. Diesen Gegebenheiten kann für eine weitere Verbesserung der Wiedergabeeigenschaften entgegengewirkt werden.

6 Englische Kurzfassung / english summary

Up to the present, color reproduction is based on systems with only three primaries. These systems are subject to major disadvantages. First to mention is a limited color space, so a considerable number of natural colors cannot be reproduced. Practical color spaces differ significantly so that many colors have to be substituted when exchanging color images between various devices („gamut mapping“). And last but not least the appearance is observer dependent because of the different sensitivities corresponding to the color matching functions of human beings.

An approach to overcome these disadvantages is based on multispectral technology. In the last years a six channel projection has been realized. 2 LCD-projectors are used to enlarge the color gamut compared to available reproduction systems (fig. 1). Moreover, the accuracy of spectral reproduction is improved because of narrow wavelength channels of about 50 nm bandwidth located between 380 and 720 nm. This reproduction system is combined with a 16 channel multispectral camera. So a complete multispectral reproduction line has been realized. An essential advantage is, that it is possible to reproduce the image for any kind of spectral illuminant exactly. The control of 6 channels is overdetermined. One approach to achieve useful results is the application of a matrix based calculation of channel intensities. Another is a stochastic optimization considering typical natural spectra (data set published by Vrhel [2]) and various human observers. Iterative improvements reach a mean color difference of 0,492 CIE ΔE_{94} if optimizing the mean difference (fig. 7) and 0,734 CIE

ΔE_{94} if optimizing the maximum difference (fig. 6). As it can be seen the optimization of maximum difference results in a more uniform color difference for all observers. So this is to favor. The maximum color reproduction difference is located at 1,8 CIE ΔE_{94} if all corrections of linearisations and spatial inhomogenities are applied. So, a multispectral projection system leads to a color reproduction accompanied by less metamerism and an enlarged color space.

7 Literatur / Veröffentlichungen

- [1] G. Wyszecki, W. S. Stiles, Color Science, John Wiley & Sons, New York, 1982
- [2] M. J. Vrhel, R. Gershon, L. S. Iwan, Measurement and Analysis of Object Reflectance Spectra, Color Res. Appl. 19, No. 1, 1991, pp. 4-9
- [3] T. Ajito, T. Obi, M. Yamaguchi, N. Ohya, Six-Primary Color Projection Display for Expanded Color Gamut Reproduction, Proc. Int. Symp. on Multispectral Imaging, Chiba University, Japan, 1999, pp. 135-138
- [4] F. König, Kenro Ohsawa, Masahiro Yamaguchi, Nagaaki Ohya, B. Hill, A multiprimary display: Discounting observer metamerism, Proc. 9th Congress of the International Colour Association (AIC Color 01 Rochester), Rochester, NY, USA, June 2001
- [5] Th. Boosmann, B. Hill, Multispektrale Bildreproduktion mit einem Sechskanaldisplay, Jahrestagung der DfWG, Hagen, Okt. 2001
- [6] Th. Keusen, Multispektrale Farbanalyse, Dissertation RWTH Aachen, Shaker Verlag, Aachen, Germany, 1996
- [7] F. König, W. Praefcke, A multispectral scanner, Colour Imaging: Vision and Technology, ISBN 0-471-98531-7, John Wiley & Sons Ltd, 1999
- [8] B. Hill, Color capture, color management and the problem of metamerism (invited), Proc. IS&T/SPIE 12th Electronic Imaging Conf., Vol 3963, San Jose´ CA, USA, 2000, pp. 3 – 14
- [9] B. Hill, Multispectral color technology: a way to high definition color image scanning and encoding (invited), Int. Symp. on Electronic Image Capture and Publishing, Zurich, Switzerland, 1998
- [10] F. König, Patrick G. Herzog, H. Büring, Moon-Cheol Kim, B. Hill, Displaying multispectral images, Int. Sympos. on Multispectral Imaging and Color Reproduction for Digital Archives, Chiba University, 1999
- [11] B. Hill, Optimization of multispectral imaging systems: best spectral match versus least observer metamerism (invited), Proc. 9th Congress of the International Colour Association (AIC Color 01 Rochester), Rochester, NY, USA, June 2001
- [12] B. Hill, Aspects of total multispectral image reproduction systems (invited), Proc. 2nd Intern. Symposium on High Accurate Color Reproduction and Multispectral Imaging, Chiba University, Japan, Oct. 2000
- [13] B. Hill, (R)evolution of Color Imaging Systems, Proc. 1st European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision CGIV 2002, April 3-5, Poitiers, France (invited)
- [14] F. König, W. Praefcke, Multispectral Image Encoding, Proc. IEEE`s Intern. Conf. on Image Proc. ICIP, 3, pp. 123-126, Kobe, Japan, 1999
- [15] L. MacDonald, St. Westland and D. Liu, Multispectral Image Encoding and Compression, Proc. CIC9: The Ninth Color Imaging Conference, Scottsdale, AZ, Nov. 6-9, 2001
- [16] P. G. Herzog, Virtual Fabrics or Multispectral Imaging in B2B, Proc. 1st European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision CGIV 2002, April 3-5, Poitiers, France