

Mehrkanalprojektion: Realisierung, Ergebnisse und Perspektiven eines multispektralen Sechskanaldisplays

Thomas Boosmann

Bernhard Hill

Farbwissenschaft und Farbbildverarbeitung

RWTH Aachen

Templergraben 55, D 52056 Aachen

eMail: boosmann@ite.rwth-aachen.de, hill@ite.rwth-aachen.de

URL: <http://www.ite.rwth-aachen.de>

Zusammenfassung: Auf dem 8. Workshop Farbbildverarbeitung 2002 wurden die Vorteile der multispektralen Farbbildverarbeitung und ein Realisierungskonzept für einen multispektralen Bildschirm vorgestellt [1]. Dieses Konzept wurde in der Zwischenzeit umgesetzt. Die erreichten Ergebnisse und die sich hierbei ergebenden Aspekte sollen in diesem Beitrag vorgestellt werden, wobei auf verschiedene Gesichtspunkte eingegangen werden soll. Neben einer prinzipiellen Darstellung der Umsetzung werden auch einige der beim realisierten Aufbau notwendigen Korrekturmaßnahmen angeführt. Zusätzlich wird eine Abschätzung des Farbumfanges gegenüber anderen Bildschirmen sowie der Gesamtheit aller Farben vorgenommen. Daneben werden die Aspekte der Ansteuerung des Displaysystems für eine Vielzahl, in den spektralen Empfindlichkeiten stark voneinander abweichender Beobachtern, erörtert und die damit erzielbaren Ergebnisse dargelegt. Hierbei lassen sich die Ansteuerwerte der Kanäle nach unterschiedlichen Gesichtspunkten und über unterschiedliche Verfahren optimieren. Nicht zuletzt werden potentielle Anwendungsfelder eines multispektralen Bildschirms vorgestellt und die Vorteile des Bildschirms bzw. der Ansteuerung für eine Vielzahl von Beobachtern gegenüber anderen Realisierungen verdeutlicht.

1 Einleitung

Die Wiedergabe von Farben auf konventionellen Bildschirmen mit drei Wiedergabekanälen führt häufig zu unzureichenden Resultaten. Zum einen läßt sich nur ein relativ beschränkter Teil aller Farben mit einem solchen Bildschirm abdecken, zum anderen ist die Ansteuerung des Bildschirms maximal für einen Beobachter exakt. Für alle anderen Beobachter, die in der Regel in ihren spektralen Empfindlichkeiten von diesem Beobachter abweichen, entstehen Farbfehler. Diese Fehler können Größen erreichen, die der Qualität der Farbwiedergabe deutlich spürbare Grenzen setzen. Dabei liegen die Ursachen für einige dieser unbefriedigenden Erscheinungen im Prinzip der Farbproduktion mit nur drei Kanälen begründet.

Die prinzipiellen Schwierigkeiten können mit Hilfe von multispektralen Bildschirmsystemen überwunden werden. Diese Wiedergabesysteme verwenden mehr als drei Kanäle und erreichen dabei zwei wesentliche Vorteile. Zum ersten wird es möglich, einen deutlich größeren Farbumfang abzudecken. Zum zweiten bietet die größere Zahl frei steuerbarer Kanäle die Möglichkeit, die Fehler der Farbproduktion für verschiedene Beobachter zu minimieren. Diese haben ihre Ursache in Abweichungen der spektralen Empfindlichkeiten zwischen verschiedenen Beobachtern. Durch die Minimierung der Beobachtermetamerie lassen sich für eine Vielzahl von Beobachtern Farbfehler erzielen, die eine Farbwiedergabe in sehr hoher Qualität ermöglicht.

2 Realisierung des Sechskanaldisplays

Für die Realisierung des multispektralen Projektionssystems wurde auf die Verwendung von zwei handelsüblichen LCD-Projektoren zurückgegriffen, die miteinander und mit einer gemeinsamen Projektionsfläche mechanisch fixiert wurden (Abb. 1). In den Strahlengang eines jeden Kanals wurde ein zusätzliches dichroitisches Kantenfilter eingefügt, das die ursprünglichen Kanäle in jeweils einen lang- und einen kurzwelligen Kanal aufspaltet. Die entstehenden sechs Kanäle besitzen im Anschluß an diese Aufspaltung eine Bandbreite von ungefähr 50 nm und decken das visuelle Spektrum von ca. 380 bis 720 nm ab (Abb. 1). Zur Beeinflussung des Weißpunktes wurden zusätzlich in einige der Strahlengänge der Kanäle Graufilter eingebracht, um eine Einstellung des Weißpunktes über eine Ansteuerung mit Signalwerten unterhalb des Maximums weitestgehend zu vermeiden, da dieses die Dynamik für die Bildwiedergabe verringern würde. Die neuen, schmalbandigeren Kanäle rücken näher an die Oberfläche des Optimalfarbkörpers. Dadurch ist es möglich einen deutlich größeren Farbraum mit dem multispektralen Projektionssystem abdecken als mit den ursprünglichen Primärvalenzen. Dieses ist als Projektion des Optimalfarbkörpers in der uv-Farbtabelle in Abb. 2 dargestellt.

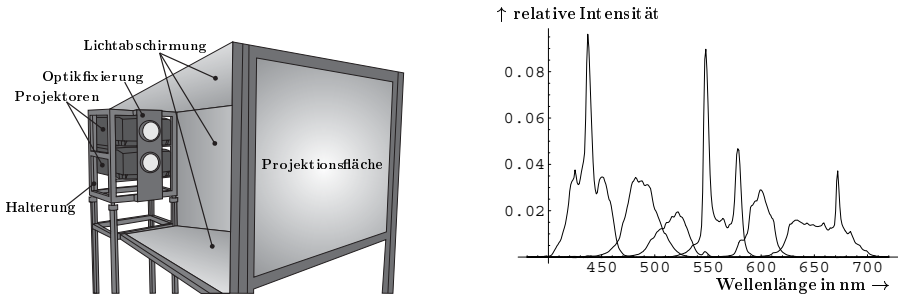


Abb. 1: Aufbau des multispektralen Projektionssystems aus zwei modifizierten LCD-Projektoren (links) und die spektrale Charakteristik des sechskanaligen Projektionssystems (rechts)

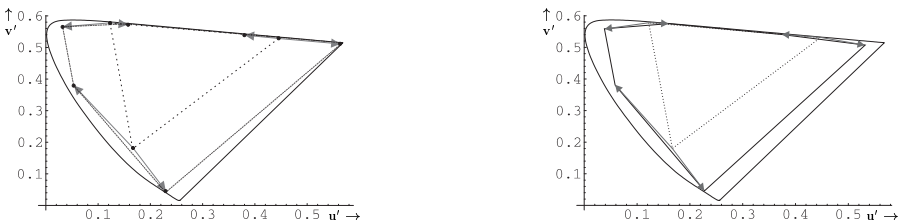


Abb. 2: Primärvalenzenaufspaltung in der CIE 1976 UCS-Farbtafel; eine ursprüngliche Primärvalenz wird durch das Einfügen von Zusatzfiltern in einen lang- und einen kurzwelligen Anteil aufgespalten, die neuen Primärvalenzen sind schmalbandiger und liegen näher am Spektralfarbenzug (links ohne, rechts mit Berücksichtigung des Schwarzoffsets)

2.1 Abschätzung des Farbumfanges

Die mit der Primärvalenzenmodifikation verbundene Vergrößerung des Wiedergabefarbraumes kann am besten im Vergleich zum Optimalfarbkörper verdeutlicht werden. Dieser Farbkörper stellt die Gesamtheit aller möglichen Farben dar, da er die Gesamtheit aller möglichen Remissionsfarben unter einer bestimmten Lichtart beinhaltet. Zum besseren Vergleich des Farbumfanges des Sechskanaldisplays werden daneben auch noch die Farbumfänge zweier konventioneller Dreikanalmonitore angegeben. Dieses sind zum einen ein CRT-, zum anderen ein TFT-Bildschirm. Die Wiedergabelichtart für alle Monitore und den Optimalfarbkörper ist D_{65} .

Bei der Berechnung und der Darstellung im CIELAB-Farbraum ist zu beachten, daß im Randbereich die Abstände für nicht mehr unterscheidbare Farbvalenzen größer als nahe der Grauchse sind. Daraus resultiert, daß die scheinbar große Lücke im Farbraum zwischen Optimalfarbkörper und dem sechskanaligen Multispektraldisplay in Abb. 3 weniger Farben entspricht, als es auf den ersten Blick den Anschein besitzt. Die neuen Farbabstandsformeln ΔE_{94} [2] und ΔE_{00} [3] sowie der DIN99-Farbraum mit ΔE_{99} [4, 5] tragen diesem Umstand im Gegensatz zum älteren aber weiter verbreiteten CIELAB-Farbraum Rechnung, der hier aber auf Grund der weiteren Verbreitung ebenfalls dargestellt wird. Durch einen geringeren Schwarzoffset des Displaysystems wäre eine weitere Vergrößerung des darstellbaren Farbraumes zu erzielen. Der Schwarzoffset bewirkt, wie es auch der Abb. 2 entnommen werden kann, eine Verschiebung der Primärvalenzen in das Innere der Farbtafel, was ebenfalls einer Verkleinerung des Farbraumes entspricht.

Durch eine zahlenmäßige Unterstreichung der Farbraumabdeckung wird die Größe des Farbraumes des Sechskanaldisplays gegenüber den anderen Monitortypen noch deutlicher erkennbar. Das Sechskanaldisplay kann gut 80%, der CRT- nur rund 25% und der TFT-Bildschirm nur gut 20% der Farben des DIN99-Farbraumes unter Bezugslichtart D_{65} abdecken. Damit ermöglicht das Sechskanaldisplay die Darstellung von über 800.000 der rund einer Mio. Farben des DIN99-Farbraumes. Die genaueren Zahlen hierzu und einige weitere An-

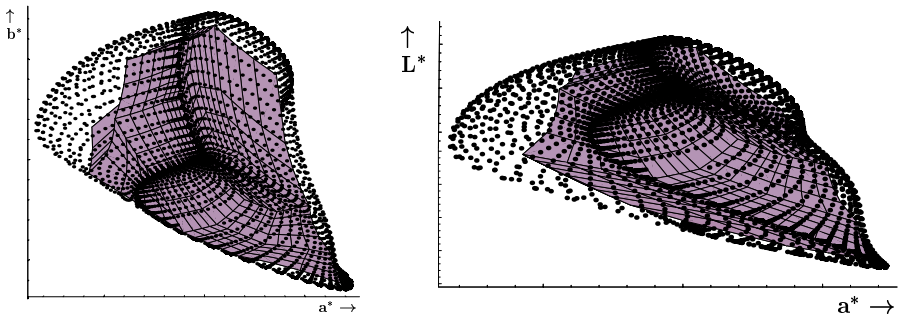


Abb. 3: Farbraumvergleich des Sechskanaldisplays mit dem Optimalfarbenkörper unter der Bezugslichtart D_{65} im CIELAB-Farbraum, in der Aufsicht (links) und der Seitenansicht (rechts); der Farbraum des Sechskanaldisplays ist ausgefüllt, der des Optimalfarbenkörpers durch Punkte dargestellt

gaben können der Tab. 1 entnommen werden. Wie bereits weiter oben erwähnt, entsprechen die Angaben zum DIN99-Farbraum besser der Wahrnehmung, da dieser Farbraum, im Gegensatz zum CIELAB-Farbraum, besser an die menschliche Farbwahrnehmung angepaßt ist. Die prozentualen Angaben in bezug auf die Gesamtheit der Farben sind dabei für den CIELAB- und DIN99-Farbraum jeweils hervorgehoben.

% der Abdeckung in	CIELAB				DIN99			
Optimalfarbenkörper	100	134,6	367,1	503,8	100	125,6	394,9	506,2
Sechskanaldisplay	74,3	100	272,7	374,3	79,6	100	314,3	402,9
CRT-Bildschirm	27,2	36,7	100	137,2	25,3	31,8	100	128,2
TFT-Bildschirm	19,9	26,7	72,9	100	19,8	24,8	78,0	100

Tab. 1: Vergleich der Größe der Farbräume von Sechskanaldisplay, CRT- und TFT-Monitor sowie vom Optimalfarbenkörper unter der Bezugslichtart D_{65} (im CIELAB- und DIN99-Farbraum)

2.2 Korrekturmaßnahmen

Auf der Projektionsfläche des Displays entstehen Abbildungsfehler, die auf Grund optischer Eigenschaften und der Eigenschaften des Projektionssystems entstehen. Diese sind zum einen in Unzulänglichkeiten der Projektoren zum anderen in den physikalischen Projektionsbedingungen begründet. Die hauptsächlichen Abbildungsfehler sind:

- Farbverzerrungen durch die nichtlineare Gradationskennlinie der Projektoren
- Versätze der einzelnen Kanäle zueinander
- Farbverläufe über die Projektionsfläche
- Zeitabhängige Intensitätsschwankungen der einzelnen Kanäle

Für eine hochwertige Bildwiedergabe müssen diese Fehler durch die Variation der Ansteuerung der Bilddaten ausgeglichen werden. Die Korrektur der nichtlinearen Gradationskennlinie der Projektoren erfolgt, wie sie auch bei konventionellen Bildschirmen üblich ist, durch eine Invertierung der Gradationskennlinie für jeden Kanal getrennt. Diese Vorgehensweise wird insbesondere dadurch erleichtert, daß bei dem hier vorliegenden Aufbau und der Konstruktion der Projektoren ein Übersprechen zwischen den einzelnen Kanälen vermieden wird.

Ferner werden die zu einem Bildpunkt gehörenden Bildpunkte der einzelnen Kanäle auf der Projektionsfläche nicht deckungsgleich übereinander sondern zueinander versetzt abgebildet. Dieser Versatz der Bildpunkte hat mehrere Ursachen, wobei drei einen entscheidenden Einfluß besitzen. Zum ersten werden die beiden Teilbilder aus übereinander angeordneten Projektoren auf den Bildschirm abgebildet. Dabei entstehen zwei trapezförmige Abbildungen, die durch die Projektoren nicht vollkommen ausgeglichen werden können.

Zum zweiten muß das Licht, das durch die LCDs geführt wird, aus parallelem Licht bestehen, d.h. es darf weder konkave noch konvexe Anteile aufweisen, da es ansonsten in der anschließend zu durchlaufenden Optik zu Divergenzen im Bild führt. Dafür müssen alle Filter in den Projektoren planparallel, als auch das Licht vor den LCDs bzw. den Filtern schon parallel sein. Die dritte Ursache besteht in der Anordnung der LCDs, die in den Projektoren voneinander getrennt sind. Das Licht muß nach deren Durchlaufen vor dem Objektiv wieder zusammengeführt werden. Ist diese Zusammenführung nicht exakt, kann es zu Versätzen zwischen den einzelnen Kanälen kommen, die nicht über das gesamte Bild gleich groß sein müssen. Die Wirkungen aller dieser Ursachen überlagern sich und ergeben einen Bildpunktversatz, der nicht homogen über der gesamten Bildfläche verläuft. Die Versätze führen dazu, daß Anteile unterschiedlicher Bildpunkte auf der Projektionsfläche einen sich neu ergebenden Bildpunkt bilden. Diese Versätze können durch das Einrechnen des umgekehrten Versatzes der Pixel in das darzustellende Bild ausgeglichen werden. Diese Korrektur läßt sich in einer solchen Qualität durchführen, daß aus der Betrachtungsentfernung des Bildes keine Pixelversätze mehr erkannt werden. Im Maximum sind sie kleiner als ein halbes Pixel, was gegenüber der Auflösung des Bildschirmes klein genug ist, um nicht wahrgenommen zu werden.

Als wichtigste Maßnahme in bezug auf die Farbwiedergabe ist es notwendig, Farbverläufe über der Bildfläche auszugleichen. So ist die Projektion einer homogenen, d.h. farblich gleich erscheinenden Bildfläche mit den schmalbandigen Kanälen des Multispektraldisplays, ohne eine bildpunktabhängige Farb- bzw. Helligkeitskorrektur der einzelnen Kanäle bei den hier verwendeten Projektoren, nicht möglich. Dieses liegt vor allem an der unterschiedlichen Positionierung der hellsten Bildpunkte auf der Bildfläche. Dieser Effekt ist u.a. in der spektralen Zusammensetzung der einzelnen Abschnitte innerhalb des Leuchtbogens der Projektorlampe und deren örtliche Abbildung durch den Projektor auf die Bildfläche bedingt. Die strahlungsintensivsten Bereiche der einzelnen Kanäle ("Hot-Spots") werden auf unterschiedliche Stellen der Bildfläche abgebildet (Abb. 4). Dieses führt dazu, daß sich bei gleichmäßiger Ansteuerung der Kanäle über der Bildfläche auf selbiger keine

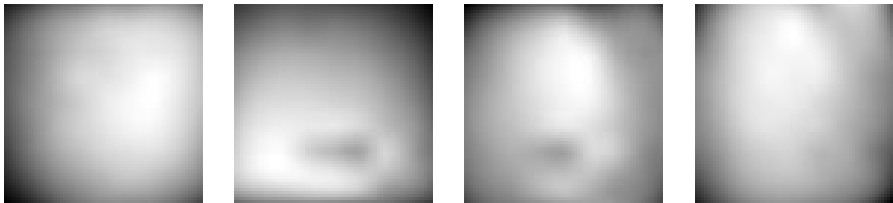


Abb. 4: Helligkeitsverteilung der Kanäle 2, 3, 5 und 6 (von links nach rechts)

homogene Farbe ergibt. Es entsteht noch nicht einmal eine zum Rand der Bildfläche hin abfallende Helligkeit bei gleichbleibender Position des Farbortes, wie man es auch von CRT-Bildschirmen kennt und nicht als störend wahrnimmt. Vielmehr entstehen Farbgradienten bzw. können entstehen, die sowohl über die Helligkeit verlaufen, als auch in der Position des Farbortes variieren. Die Erkenn- und Wahrnehmbarkeit der Variation des Farbortes von Pixeln an unterschiedlichen Stellen auf der Projektionsfläche ist durch die spektrale Aufspaltung der originalen Projektorkanäle zur Erreichung der schmalbandigen Multispektralkanäle verstärkt worden. Diese Erscheinung der Farbverläufe ist jedoch nicht unbedingt ein allgemeines Problem der multispektralen Projektion sondern ist sehr von den Projektoren abhängig.

Für die Korrektur der Farbverläufe ist es notwendig zuerst einmal deren geometrische Zusammensetzung aufzunehmen. Zu diesem Zweck werden in einem gleichabständigen Raster die Helligkeiten der sechs Multispektralkanäle sowie des Schwarzoffsets an 81 Meßpunkten, in der Anordnung von 9x9 Meßpunkten über der Bildfläche aufgenommen. Diese Anzahl von gleichabständigen Meßpunkten ist notwendig, da der Helligkeitsverlauf der einzelnen Kanäle mit Hilfe weniger Meßpunkte nicht ausreichend genau beschrieben werden kann. Die Modellierung des Farbverlaufes kann im Anschluß an die Messung umgekehrt und zueinander relativiert werden. Der Schwarzoffset ist dabei spektral zu betrachten, da er sich nicht gleichmäßig aus allen Kanälen darstellen läßt. Das entstehende Ergebnis kann mit den Bilddaten verrechnet werden. Dabei wird eine Homogenität der Bilddarstellung erreicht, die gegenüber der leichten Winkelabhängigkeit der Bildschirmoberfläche nicht mehr in Erscheinung tritt.

Für eine Korrektur der zeitabhängigen Intensitätsschwankungen ist es notwendig, die Schwankungen der einzelnen Kanäle zu messen. Hierfür sind Sensoren in die Projektoren eingebaut worden, die die bildinhaltsunabhängige Intensität der einzelnen Kanäle bestimmen. Die Schwankungen sind in einem großen Maße durch Störungen bedingt, die von außen über die Stromversorgung zugeführt werden. Eine Regulierung und Filterung der Stromversorgung der Lampen zur Vermeidung von Netzstörungen konnte aus Aufwandsgründen nicht durchgeführt werden, ebensowenig eine Nachführung der Ansteuerwerte, weil die Sprünge zu schnell für die Grafikkarten dieses experimentellen Aufbaus verlaufen. Die Korrektur der Schwankungen ist aber für einen Neuentwurf vorgesehen. Die vorhandenen Lampenschwankungen stellen somit beim realisierten Display die Hauptfehlerquelle dar. Über viele Meßreihen wurde so für den Weißpunkt ein maximaler Farbfehler von $\Delta E_{94} = 3,15$ ermittelt, der aber nur kurzzeitig auftrat. Die Fehler über einen längeren Zeitraum befinden sich eher in einer Größenordnung von 1 bis $1,5 \Delta E_{94}$.

3 Ansteuerung eines Multispektraldisplays

Für die Farbproduktion mit drei Primärvalenzen bzw. drei Kanälen ist es, um Farbfehler zu vermeiden, zwingend notwendig, daß das Wiedergabesystem eine Linearkombination des Aufnahmesystems darstellt und das wiederum eine Linearkombination der spektralen Augenempfindlichkeiten. Da jedoch jeder Beobachter unterschiedliche Empfindlichkeitskurven besitzt und zum anderen die spektralen Empfindlichkeiten des Beobachters nicht exakt nachgebildet werden können, ist die Aufnahme und die Wiedergabe immer mit Farbfehlern verbunden. Abgesehen davon ist der Farbraum, den solche Wiedergabegeräte abdecken können, nicht sehr umfangreich.

Unter anderem aus diesem Grund haben in den vergangenen Jahren weltweit mehrere Gruppen begonnen, experimentelle multispektrale Bildwiedergabesysteme zu realisieren [6, 7, 8]. Diese verfügen über jeweils fünf bis sechs Primärvalenzen und erreichen dabei alle eine deutliche Vergrößerung des Farbraumes gegenüber herkömmlichen Bildschirmen. Ein grundlegendes Problem bei solchen Bildschirmen ist jedoch die Ansteuerung der mehr als drei Primärvalenzen. Denn zum einen sind die farbmetrischen Gleichungen überbestimmt, andererseits ist aber die Anzahl an Primärvalenzen nicht ausreichend, um den Reiz spektral nachzubilden. Dieser Problemstellung wird auf unterschiedliche Weise Rechnung getragen, da auch die Ziele dieser Gruppen voneinander variieren. Durch den höheren Grad an Freiheit, der für die farbmetrische Ansteuerung durch die größere Anzahl an Primärvalenzen entsteht, ist es möglich, die Metamerie zu beseitigen oder zumindestens deutlich zu minimieren. Diese Möglichkeit wird jedoch nicht von allen Gruppen wahrgenommen. So konzentrieren sich etliche Publikationen ausschließlich auf die Vergrößerung des abgedeckten Farbraumes [8, 9, 10, 11], eine weitere [12] verwenden sechs Gleichungen, um die Farbwiedergabe für zwei Beobachter, namentlich den CIE 2°- und den CIE 10°-Normalbeobachter [13], exakt zu gestalten. Nur wenige Ansätze verfolgen das Ziel, die Metamerie für eine größere Anzahl von Beobachtern zu minimieren. Die hierbei eingesetzten Methoden beruhen entweder auf dem Linearen Programmieren [14] oder auf stochastischen Iterationen [15, 16, 17]. Die Ergebnisse, die damit erreichbar sind, sollen im folgenden genauer beschrieben werden.

Ansteuerung für eine Vielzahl von Beobachtern

Damit die Farbfehler abgeschätzt und die Metamerie der Beobachter beurteilt werden kann, mußte im Rahmen dieses Projektes zuerst ein Satz von Beobachterempfindlichkeiten zusammengestellt werden. Dafür wurden insgesamt 24 verschiedene Beobachter (Abb. 5), die sich in ihren spektralen Empfindlichkeiten möglichst stark voneinander unterscheiden, berücksichtigt. Diese beinhalten die Normbeobachter, die Standardabweichler [18] sowie Kurven aus den Datensätzen von Judd, Stiles und Burch [19].

Durch die starke Streuung der Beobachterempfindlichkeiten soll erreicht werden, daß die Aussagen der Untersuchungen und die Ansteuerung des Displays repräsentativ sind. Das heißt, daß die Aussagen für quasi jeden normalsichtigen Beobachter gültig sind. Dabei ist deutlich zwischen den maximalen und den mittleren Farbfehlern zu unterscheiden. Bei einer Minimierung des maximalen Farbfehlers wird die Obergrenze des Fehlers verringert, den überhaupt ein Beobachter sehen kann. Bei einer Minimierung des mittleren Farbfehlers wird nur der Durchschnitt der Farbdarstellungen verbessert. Dieses besitzt aber keinen großen Einfluß auf den maximalen Farbwiedergabefehler. In den meisten Fällen wird sogar ein geringerer mittlerer Farbfehler auf Kosten eines größeren maximalen Farbfehlers erkauf und umgekehrt. Als Fehlerobergrenze ist deshalb der maximale Farbfehler der 24 Beobachter der entscheidendere, denn durch ihn wird sichergestellt, daß keiner

der Beobachter einen größeren Farbfehler erkennen kann. Ansonsten zeigt sich, daß bei einer ausschließlichen Betrachtung des mittleren Farbfehler der ein oder andere Beobachter immer wieder erheblich größere Unterschiede erkennen kann. Dadurch wäre für eine hochqualitatives Farbproduktionssystem jedoch keine Wiedergabequalität garantiert. Aus diesem Grund wird hier vornehmlich der maximale Farbwiedergabefehler als Kriterium verwendet.

3.1 Ansteuerverfahren

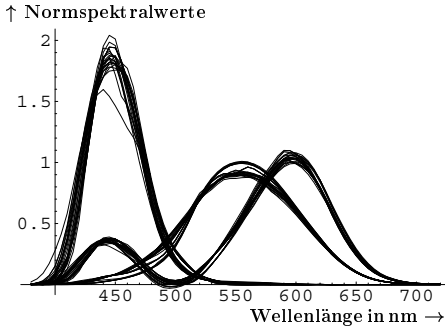


Abb. 5: Empfindlichkeitskurven von 24 Beobachtern

verläuft. Ein solches Ergebnis konnte nicht erwartet werden. Diese Erkenntnis ermöglicht es, ein gradientenbasiertes Verfahren zu verwenden, das, zumindestens in der Nähe des Startwertes, das lokale, bei ausreichend gutem Startwert auch das globale Fehlerminimum erreicht. Einen allgemeingültigen Beweis stellt diese Erkenntnis nicht dar. Einen ähnlichen Zusammenhang wie bei den realisierten Kanälen aus Abb. 1 kann man jedoch auch bei idealen, gaußförmigen Kanalspektren beobachten.

3.2 Ergebnisse der Ansteuerung

Mit Hilfe des gradientenbasierten Iterationsverfahren lassen sich die möglichen Grenzen der Farbwiedergabe-näufigkeit eines multispektralen Displaysystems abschätzen. Insgesamt wurde die Untersuchung für 52 verschieden Lichtarten durchgeführt. Dabei werden sowohl genormte Lichtarten als auch selber vermessene, reale Lichtquellen verwendet. Auf diese Weise geht eine Vielzahl unterschiedlicher Spektralcharakteristika, die zum einen theoretischen, zum anderen experimentellen Ursprungs sind, in die Untersuchung ein. Ebenfalls wurden sowohl glatt bzw. relativ glatt verlaufende Spektren wie D_{50} , D_{55} , D_{65} , A , B , C und Temperaturstrahler, als auch durch schmal- oder breiterbandige Peaks gekennzeichnete Lichtquellenspektren in den Datensatz aufgenommen. Als Beispiel hierfür seien die genormten Lichtquellen F_1 bis F_{12} genannt.

Die maximalen Fehler, die ein Beobachter bei der Reproduktion einer spektralen Vorlage mit den Kanälen des multispektralen Displays erkennen kann, sind eher gering. Bei einigen Lichtarten sind sie sogar so gering, daß man sagen kann, daß für keinen Beobachter Unterschiede wahrnehmbar sind. Dabei kann man bei den realisierten Kanalspektren, die mit Projektoren auf Basis von UHP-Lampen realisiert wurden und dem vorhandenen Schwarzoffset nicht behaupten, daß diese ideal seien. Aus diesem Grund wurden die Untersuchungen zusätzlich auch für die schon erwähnten sechs idealen, gaußförmigen Kanalspektren durchgeführt. Alle Berechnungen wurden dabei zwischen 380 und 720 nm bei einer Schrittweite von 1 nm durchgeführt, um auch die Peaks in den Lampen- und Kanalspektren als auch die Differenzen in den Beobachterempfindlichkeiten ausreichend berücksichtigen zu können.

Als Beispiel für die erzielbaren Ergebnisse sei hier stellvertretend die Reproduktion sämtlicher Spektren des Vrhel-datensatzes unter der verbreiteten Lichtart D_{65} genannt, bei der für die realisierten Kanalcharakteristika im Maximum über alle 24 Beobachter ein Farbwiedergabefehler von nur $\Delta E_{94,max} = 1,16$ bei einem Mittelwert

Neben einem Satz von Beobachtern ist es notwendig, einen repräsentativen Satz von Spektren zu verwenden, damit eine Aussage über die Qualität der Ansteuerung verallgemeinert werden kann. Hierfür wurde der spektrale Datensatz von Vrhel [20] ausgewählt, der eine breite Streuung an Remissionspektren beinhaltet.

Bei der Verwendung eines Fehlerkriteriums, das von einer Vielzahl von Beobachtern abhängt, wechseln die Beobachter, die den maximalen Farbfehler verursachen. Untersucht man den N -dimensionalen Lösungsraum, wobei N die Anzahl der Wiedergabekanäle kennzeichnet, in dem sich die maximalen Farbfehler der 24 Beobachter befinden, so zeigt sich, daß sich dieser trotz der wechselnden Beobachter, die die maximalen Farbfehler verursachen, eher stetig

von nur $\overline{\Delta E_{94}} = 0,29$ erreicht wird. Zu beachten ist, daß trotz der kleinen Farbproduktionsfehler der Algorithmus nicht garantieren kann, daß das globale Minimum der maximalen Farbwiedergabefehler gefunden wird, obwohl die Ergebnisse adäquat genug sind, um nahe dem globalen Reproduktionsfehlerminimum zu liegen.

Die Untersuchungen zeigen, daß sich die erzielbaren Ergebnisse um so stärker verschlechtern, je weiter sich die spektralen Eigenschaften der Reproduktionslichtarten oder -quellen von denen der LCD-Projektoren entfernen. Dieses trifft auch darauf zu, je weiter sich die Lichtarten in ihren Eigenschaften von den standardisierten Lichtarten wie D_{50} , D_{55} , D_{65} und D_{75} entfernen. Im ganz besonderen Fall gilt dieses, wenn sehr hohe oder sehr niedrige Farbtemperaturen berücksichtigt werden.

Des weiteren sind die Farbwiedergabefehler etwas kleiner, wenn die idealen Kanalcharakteristika anstelle der realen, experimentellen Kanalcharakteristika für die Simulation verwendet werden. Eine Ausnahme hierfür stellen verständlicherweise die Lichtquellen dar, die denen der LCD-Projektoren sehr ähnlich sind. Das Minimum der maximalen Farbfehler $\Delta E_{94_{max}} = 0,77$ wird für die Lichtart F_1 erreicht. Hier liegt auch der Farbfehler für die idealen Kanäle in der gleichen Größe. Die mittleren Farbfehler $\overline{\Delta E_{94}}$ sind über nahezu alle Lichtquellen vernachlässigbar, wobei aber auch die Aussagekraft dieses Farbfehlers bezweifelt werden darf. Der Farbfehler für das Gleichenergieweiß ist, wie bei nahezu allen Untersuchungen, mit $\Delta E_{94_{max}} = 1,71$ relativ groß. Eine Auflistung von Reproduktionsfehlern über eine Auswahl weiterer Lichtarten ist der Tabelle 2 zu entnehmen.

	D_{50}	D_{55}	D_{65}	A	B	C	E	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
<i>reale K.</i> : $\Delta E_{94_{max}}$	1,05	1,06	1,16	1,49	0,97	1,05	1,71	0,77	0,79	1,02	1,47	0,75
<i>reale Kanäle</i> : ΔE_{94}	0,28	0,28	0,29	0,36	0,26	0,25	0,35	0,18	0,19	0,23	0,28	0,19
<i>ideale K.</i> : $\Delta E_{94_{max}}$	0,59	0,61	0,84	0,54	0,58	0,70	1,58	0,77	0,71	0,78	0,90	0,76
<i>ideale Kanäle</i> : ΔE_{94}	0,11	0,13	0,16	0,11	0,10	0,12	0,30	0,13	0,14	0,17	0,20	0,13

Tab. 2: Farbdifferenzen zwischen Originalspektrum aus dem Vrhel-datensatz [20] und der simulierten Reproduktion unter Verwendung der Kanalspektren des realisierten Labormodells (Abb. 1) und der idealen, gaußförmigen Kanalcharakteristika, berechnet für 24 Beobachter unter verschiedenen Lichtarten

4 Ausblick auf potentielle Anwendungen der multispektralen Displaytechnik

Das potentielle Einsatzgebiet für ein multispektrales Display ist vielfältig. Es erschließen sich vornehmlich in den Bereichen, in denen zum einen eine Vergrößerung des Farbraumes gegenüber den Bildschirmen mit konventioneller Dreikanaltechnik erforderlich oder gewünscht ist und zum anderen in den Bereichen, in denen eine sehr hohe Verbindlichkeit an die Reproduktion von Farben gestellt wird. Bei dem zu letzt genannten Punkt trifft dieses vor allem auf die metameriefreie Wiedergabe von Farben zu. Beim Einsatz eröffnen sich somit zwei Zweige. Einer, in dem die elektronische Farbbildverarbeitung schon jetzt eingesetzt wird und ein Weiterer, in dem diese auf Grund der noch unbefriedigenden Farbraumabdeckung oder der mangelnden Qualität der Farbdarstellung bislang noch keine Anwendung fand.

Als Einsatzgebiete sind hierbei die Textilindustrie oder die Archivierung von Kunstwerken zu nennen. In beiden Bereichen wird eine elektronische Farbbildverarbeitung schon jetzt verwendet, stößt aber häufig auf Grund der eingesetzten Geräte an ihre Grenzen. Ein weiterer Bereich, in dem sie auch schon eingesetzt wird, aber auf Grund der mangelnden Farbraumgröße und Genauigkeit in manchen Teilgebieten noch nicht eingesetzt werden kann, ist der medizinische Sektor. Hier mangelt es bislang an einer ausreichenden Existenz von genügend vielen rötlichen, vor allem gesättigten Nuancen und diese in einer entsprechenden Genauigkeit. Beiden Ziele sind jedoch mit der multispektralen Displaytechnik abdeckbar.

Zusätzlich sind Anwendungen in der Druckindustrie denkbar, wobei hier vor allem die Druckvorstufe zu nennen ist. Andere Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich in der Kunststoff-, Lack- oder Automobilindustrie. Aber auch bei der Entwicklung von Drucksystemen wäre ein Einsatz möglich, wenn das Display als Proofsystem oder Simulator von Gerätefarbräumen verwendet wird, um die erzielbaren Ergebnisse schon vor der Umsetzung zu visualisieren.

Der Einsatz der multispektralen Displaytechnologie wird sich höchstwahrscheinlich zuerst auf diese oder ähnliche, sehr spezielle Benutzerkreise beschränken. Ein Übergang vom professionellen in den nicht profes-

sionellen Bereich ist eher für die etwas fernere Zukunft zu erwarten. Für diesen Konsumerbereich sollten die Stückzahlen der Displays groß genug sein, damit die Preise für dieses Segment erschwinglich werden. Theoretisch wäre aber auch hier eine Abdeckung schon von Beginn an mit sehr speziellen Geräten vorstellbar.

Literatur

- [1] Th. Boosmann, B. Hill, "Mehrkanalprojektion: Vorteile und Realisierungskonzept eines multispektralen Sechskanaldisplays (Multichannel projection: advantages and realization of a multispectral six-channel display)", Proc. 8th Workshop of the German Color Group, Ilmenau, Oct. 2002, ISSN 1432-3346, pp. 19-26
- [2] CIE 116-1995, "Industrial Colour-Difference Evaluation", Technical Report, Commission International de l'Eclairage, Vienna, 1995, ISBN 3 900 734 607
- [3] CIE Publication 142-2001, "Improvement to Industrial Colour-Difference Evaluation", Commission International de l'Eclairage, Vienna, 2001, ISBN 3 901 906 08 8
- [4] DIN 6176, „Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der DIN99-Formel“, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Beuth Verlag, Berlin, März 2001
- [5] H. Büring, „Eigenschaften des Farbraumes nach DIN 6176 (DIN99-Formel) und seine Bedeutung für die industrielle Anwendung,“ Proc. 8th Workshop of the German Color Group, Ilmenau, Oct. 2002, ISSN 1432-3346, pp. 11-17
- [6] T. Ajito, T. Obi, M. Yamaguchi, N. Ohya, "Expanded color gamut reproduced by six-primary projection display", Proc. Electronic Imaging 2000, Photonics West, SPIE Vol. 3954, San José, CA, USA, 2000, pp. 130-137
- [7] 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
- [8] M.-C. Kim, Y.-C. Shin, Y.-R. Song, S.-J. Lee, I.-D. Kim, "Wide Gamut Multi-Primary Display for HDTV", Proc. 2nd European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision CGIV 2004, Aachen, Germany, April 5-8, 2004, pp. 248-253
- [9] T. Ajito, K. Ohsawa, T. Obi, M. Yamaguchi, N. Ohya, "Color conversion method for multiprimary display using matrix switching", Optical Review, Vol. 8, No. 3, 2001, pp. 191-197
- [10] F. König, N. Ohya, B. Hill, K. Ohsawa, M. Yamaguchi, "A Multiprimary Display: Optimized Control Values for Displaying Tristimulus Values", Image Processing, Image Quality and Image Systems Conference PICS, Portland, Oregon, USA, April 7-10, 2002
- [11] H. Motomura, H. Haneishi, M. Yamaguchi, N. Ohya, "Backward Model for Multi-Primary Display Using Linear Interpolation on Equi-luminance Plane", Proc. IS&T's 10th Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, Applications, Scottsdale, AZ, USA, Nov. 12, 2002, pp. 267-271
- [12] K. Ohsawa, F. König, M. Yamaguchi, N. Ohya, "Multi-primary display optimized for CIE1931 and CIE1964 color matching functions", Proc. 9th Congress of the International Colour Association (AIC Color 01), Rochester, NY, USA, June 24-29, 2001, Proc. SPIE Vol. 4421, 2002, pp. 939-942
- [13] CIE Publication 15.2, "Colorimetry, Second Edition", Commission International de l'Eclairage, Vienna, 1986, ISBN 3 900 734 003
- [14] F. König, K. Ohsawa, M. Yamaguchi, N. Ohya, B. Hill, "A multiprimary display: Discounting observer metamerism", Proc. 9th Congress of the International Colour Association (AIC Color 01), Rochester, NY, USA, June 24-29, 2001, Proc. SPIE Vol. 4421, 2002, pp. 898-901
- [15] B. Hill, "Optimization of Total Multispectral Imaging Systems: Best Spectral Match versus least Observer Metamerism" (invited), Proc. 9th Congress of the International Colour Association (AIC Color 01), Rochester, NY, USA, June 24-29, 2001
- [16] Th. Boosmann, B. Hill, "Control Algorithm for 6-Primary Displays Minimizing Effects of Observer Metamerism", PICS: The Digital Photography Conference, Rochester, NY, USA, May 13-16, 2003, pp. 244-249
- [17] Th. Boosmann, B. Hill, "Estimation of Control Values for a 6-Primary Display Considering Different Observers", Proc. 2nd European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision CGIV 2004, Aachen, Germany, April 5-8, 2004, pp. 242-247
- [18] CIE Techn. Report Publ. No. 80, "Special Metamerism Index: Observer Metamerism", 1989, ISBN 3 900 734 17 8
- [19] G. Wyszecki, W.S. Stiles, "Color Science - Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae", Second Edition, John Wiley & Sons, New York, 2000, ISBN 0-471-39918-3
- [20] M.J. Vrhel, R. Gershon, L.S. Iwan, "Measurement and Analysis of Object Reflectance Spectra", Color Research and Application, Vol. 19, No. 1, February 1994, pp. 4-9