

Konstruktion von Kamerafarbkörpern

Stephan Helling

Farbwissenschaft und Farbbildverarbeitung
RWTH Aachen
Templergraben 55, D 52056 Aachen
eMail: helling@ite.rwth-aachen.de
URL: <http://www.ite.rwth-aachen.de>

Zusammenfassung: Es existieren zahlreiche Kriterien zur Beurteilung der Rekonstruktionsgüte von multispektralen Kameras. Als zwei der häufigsten werden Farbunterschiede im CIELAB-Farbraum, gemessen in ΔE_{00} , oder das spektrale Fehlerquadrat herangezogen. In diesem Beitrag wird ein weiteres Kriterium vorgestellt, das auf der Bewertung des von einer Multispektralkamera erreichbaren Farbumfanges, des Kameragamuts, basiert. Dieser Farbkörper wird für verschiedene Multispektralkameras mit unterschiedlicher Kanalzahl berechnet. Es wird gezeigt, daß der Gamut bereits ab einer Kanalzahl von 9 eine nahezu optimale Form annimmt, die den gesamten Farbkörper natürlicher Farben abdeckt.

1 Einleitung

Die Bewertung der Genauigkeit der Farbaufnahme von Multispektralkameras [1, 2, 3] erfolgt bisher z. B. durch einen Vergleich zwischen einem spektralen Referenzdatensatz und den von der Kamera geschätzten Spektren in Form eines aufsummierten quadratischen Fehlers. Auch die Bestimmung des Farbabstands zwischen den zu den Spektren korrespondierenden Farben im CIELAB-Farbraum mittels einer geeigneten Farbabstandsformel (ΔE_{00} , [4]) liefert Aussagen über die Aufnahmequalität.

Eine zweite wichtige Frage neben diesen Kriterien ist die nach einem Farbkörper, der die Gesamtheit der von der Kamera korrekt aufnehmbaren Farben beschreibt. Jede von der Kamera aufgenommene Farbe wird, abhängig von ihrer ursprünglichen Lage im Normvalenzsystem, in diesen Körper projiziert. Ein solcher Farbkörper (Gamut) bildet das aufnahmeseitige Äquivalent zu den Farbkörpern, wie sie auf der Wiedergabeseite, z.B. für Monitore oder Drucker, allgemein bekannt sind. In diesem Fall ist der Gamut durch die Gesamtheit aller Linearkombinationen der Primärvalenzen bestimmt. Für eine Dreikanalkamera wurde von Pujol et. al. [5] ein Algorithmus vorgeschlagen, der den Farbraum durch Betrachtungen des Optimalfarbenkörpers schätzt. In diesem Beitrag wird ein erweitertes Verfahren angewendet, mit dem der Gerätegamut von linearen Aufnahmesystemen mit beliebiger Kanalzahl berechnet werden kann. Dazu wurden umfangreiche Simulationen der Farbaufnahme von Optimalfarben mit (Multispektral-) Kameras bei variabler Kanalzahl durchgeführt und die reproduzierten Spektren untersucht. Die konvexe Hülle, die um die Menge dieser transformierten Farben gelegt wird, gibt den Gamut der betrachteten Kamera an.

Aufbauend auf diese Erkenntnisse wird im zweiten Teil die Abhängigkeit der Form des Gamuts von der Zahl der Kanäle studiert. Es wird gezeigt, daß der Gerätegamut ab einer gewissen Kanalzahl eine optimale Form im Sinne der Abdeckung des Körpers der natürlichen Farben annimmt.

2 Konstruktion des Kameragamuts

2.1 Kameramodell und Schätzung

Der hier vorgestellte Algorithmus zur Berechnung von Kamerafarbkörpern setzt voraus, daß sowohl die Kamera als auch die spektrale Rekonstruktion bzw. die RGB-Wert-Schätzung im Falle von Dreikanalkameras mit linearen Modellen beschrieben werden können. Abb. 1 zeigt dazu die Modellierung des Aufnahme- und spektralen Schätzprozesses am Beispiel einer Multispektralkamera mit n Kanälen. Es gilt:

$$\vec{s}_{rek} = \vec{V} \mathbf{K}_{inv} = \vec{s}_{org} \mathbf{K} \mathbf{K}_{inv}.$$

Das Originalspektrum liegt abgetastet als m -dimensionaler Vektor $\vec{s}_{org} = (s_{0,org}, s_{1,org}, \dots, s_{m-1,org})$ vor. Im Kameramodell wird dieser durch Multiplikation mit der $m \times n$ -dimensionalen Matrix \mathbf{K} in den n -dimensionalen Signalraum transformiert. Der resultierende Signalvektor \vec{V} wird unter Ausnutzung der Glattheit von

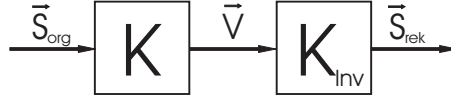


Abb. 1: Lineare Modelle des Aufnahme- und spektralen Schätzprozesses bei einer Multispektralkamera mit n Kanälen. Das Eingangsspektrum \vec{S}_{org} wird als Vektor aufgefaßt und mit einer Matrixoperation \mathbf{K} auf einen Signalvektor \vec{V} abgebildet, der wiederum auf ein rekonstruiertes Spektrum \vec{S}_{rek} abgebildet wird.

natürlichen Spektren durch eine dem Kameramodell näherungsweise inverse Transformation \mathbf{K}_{inv} ($n \times m$) in ein m - dimensionales geschätztes Spektrum \vec{S}_{rek} überführt. Die gesamte Transformation

$$\mathbf{T} = \mathbf{K}\mathbf{K}_{inv} \quad (1)$$

hat den Charakter einer Matrixabbildung mit $\mathbf{T} : \mathfrak{R}^n \rightarrow \mathfrak{R}^m$.

Eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für die Möglichkeit der exakten Rekonstruktion ist, daß die Matrix \mathbf{K} $m \times m$ -dimensional, also quadratisch ist. In diesem Fall entspricht die Zahl der Kanäle genau der Zahl der spektralen Abtastwerte in \vec{S}_{org} . In der Praxis wird jedoch aus Aufwandsgründen immer eine möglichst geringe Zahl von Kanälen angestrebt werden. Untersuchungen haben gezeigt, daß bereits ab einer Kanalzahl von 6 gute Rekonstruktionsergebnisse erzielt werden können [1, 2, 3].

Für eine herkömmliche Dreikanalkamera kann die Matrix \mathbf{K}_{inv} durch eine $n \times 3$ -dimensionale Schätzmatrix ersetzt werden, die die Kanalsignale direkt auf RGB- oder XYZ-Tripel abbildet [5]. Die Berechnung der Normfarbwerte $\vec{X} = (X, Y, Z)$ aus den originalen bzw. aus den von der Multispektralkamera rekonstruierten Spektren läßt sich ebenfalls durch eine Matrixmultiplikation beschreiben:

$$\begin{aligned} \vec{X}_{org} &= \vec{S}_{org}\mathbf{X} \\ \vec{X}_{rek} &= \vec{S}_{rek}\mathbf{X} = \vec{S}_{org}\mathbf{K}\mathbf{K}_{inv}\mathbf{X} \end{aligned} \quad (2)$$

Die Einträge in den Spalten der Matrix \mathbf{X} bilden dabei die Normspektralwertkurven, die jeweils für das Einstellen des Bezugsweiß mit Konstanten multipliziert werden müssen.

2.2 Eigenschaften der linearen Modellierung

Gegeben seien zwei nicht überlappende Remissionsspektren $\vec{S}_{1,org}$ und $\vec{S}_{2,org}$ unter der Lichtart E. Für ein drittes, aus diesen Spektren linear überlagertes Spektrum gelte

$$\vec{S}_{3,org} = \vec{S}_{1,org} + \alpha\vec{S}_{2,org} \quad (3)$$

mit $\alpha \in [0, 1]$, reell. Für die zu diesen Spektren korrespondierenden Normfarbvalenzen gilt

$$\begin{aligned} \vec{X}_{1,org} &= \vec{S}_{1,org}\mathbf{X} \\ \vec{X}_{2,org} &= \vec{S}_{2,org}\mathbf{X} \\ \vec{X}_{3,org} &= (\vec{S}_{1,org} + \alpha\vec{S}_{2,org})\mathbf{X} \\ &= \vec{S}_{1,org}\mathbf{X} + \alpha\vec{S}_{2,org}\mathbf{X} \\ &= \vec{X}_{1,org} + \alpha\vec{X}_{2,org} \end{aligned}$$

Jede nach Gleichung 3 vorgenommene Überlagerung der beiden Spektren $\vec{S}_{1,org}$ und $\vec{S}_{2,org}$ resultiert also in einer Farbvalenz, die auf der Verbindungsstrecke der Valenzen $\vec{X}_{1,org}$ und $(\vec{X}_{1,org} + \vec{X}_{2,org})$ liegt.

Im folgenden wird der Einfluß des Kameramodells und der spektralen Schätzung auf diese Strecke betrachtet. Nach Gln. 2 und 3 gilt für die Farbvalenzen der rekonstruierten Spektren:

$$\begin{aligned}
 \vec{X}_{1,rek} &= \vec{S}_{1,rek} \mathbf{X} = \vec{S}_{1,org} \mathbf{K} \mathbf{K}_{inv} \mathbf{X} \\
 \vec{X}_{2,rek} &= \vec{S}_{2,rek} \mathbf{X} = \vec{S}_{2,org} \mathbf{K} \mathbf{K}_{inv} \mathbf{X} \\
 \vec{X}_{3,rek} &= \left(\vec{S}_{1,rek} + \alpha \vec{S}_{2,rek} \right) \mathbf{X} \\
 &= \left(\vec{S}_{1,org} \mathbf{K} \mathbf{K}_{inv} + \alpha \vec{S}_{2,org} \mathbf{K} \mathbf{K}_{inv} \right) \mathbf{X} \\
 &= \vec{X}_{1,rek} + \alpha \vec{X}_{2,rek}
 \end{aligned}$$

Die Farbvalenzen der rekonstruierten Spektren sind im allgemeinen gegenüber den originalen verschoben. Für die Berechnung der rekonstruierten Mischfarben reicht es jedoch, die Farbvalenzen $\vec{X}_{1,rek}$ und $\left(\vec{X}_{1,rek} + \vec{X}_{2,rek} \right)$ der beiden rekonstruierten Grundfarben zu kennen, denn alle Mischfarben liegen wieder auf der Verbindungsstrecke zwischen diesen beiden. Auch die Parametrierung der Strecke bleibt erhalten. Letztendlich bedeutet dies, daß die Kenntnis der Abbildung des Spektralfarbenzugs ausreicht, um die Abbildung beliebiger Remissionsspektren zu beschreiben, da sich jedes natürliche Remissionsspektrum als Superposition von spektralen Anteilen darstellen läßt. Diese Konsequenzen, die sich aus der Linearität des Modells ergeben, sind die Grundlage für die Konstruktion des Kamerafarbraums.

2.3 Konstruktion des Kameragamuts

Der Gamut von Geräten der Wiedergabeseite beschreibt, welche Farben auf dem Gerät reproduzierbar sind. Für Geräte der AufnahmeSeite wird der Gamut leicht abweichend definiert: Er gibt an, in welchen Bereich im Farbraum alle von der Kamera aufgenommenen Spektren über die Matrixtransformation $\mathbf{T} = \mathbf{K} \mathbf{K}_{inv}$ abgebildet werden, auch wenn die dazugehörigen Farborte ursprünglich außerhalb lagen.

Zur Bestimmung dieses Farbkörpers werden die Spektren der Optimalfarben betrachtet. Es ist bekannt, daß eine Optimalfarbe diejenige Farbe einer bestimmten Helligkeit und eines bestimmten Bunntonwinkels ist, die maximal gesättigt ist. Zudem läßt sich eine beliebige Mischfarbe als Linearkombination von Optimalfarben darstellen. Aufgrund der Konvexität des Optimalfarbkörpers im Normfarbraum liegt jede dieser Mischfarben innerhalb des Optimalfarbenkörpers.

Der Spektraldatensatz der Optimalfarben $\mathbf{S}_{opt,org}$ werde nun über die Transformation \mathbf{T} auf den rekonstruierten Spektraldatensatz $\mathbf{S}_{opt,rek} = \mathbf{S}_{opt,org} \mathbf{T}$ abgebildet. Über die Form des dadurch im Normfarbraum entstehenden transformierten Körpers können zunächst keine allgemeinen Aussagen gemacht werden. Zwar wird sich eine im Grundsatz ähnliche Form ergeben, im allgemeinen muß jedoch davon ausgegangen werden, daß die Konvexität dieses Körpers durch die Transformation nicht erhalten bleibt. Nach Absatz 2.2 bleiben jedoch die Mischgesetze erhalten, d.h. der transformierte Farbort einer Linearkombination von Optimalfarben ist identisch mit dem Farbort der Linearkombination der transformierten Optimalfarben mit derselben Gewichtung.

Diese Eigenschaft ergibt zusammen mit der Voraussetzung, daß jede beliebige Farbe durch eine Linearkombination von Optimalfarben dargestellt werden kann, die Beschreibung des Kameragamuts: die um den transformierten Optimalfarbenkörper geschlagene konvexe Hülle enthält sämtliche Linearkombinationen von transformierten Optimalfarben. Jede aufgenommene Farbe kann sich nur innerhalb dieser Hülle befinden. Damit kann die konvexe Hülle des transformierten Optimalfarbenkörpers als Kameragamut verstanden werden.

3 Simulationen

Methode

Es wurden umfangreiche Simulationen durchgeführt, um Aufnahme und Rekonstruktion unterschiedlicher spektraler Vorlagen als Funktion der Zahl der Kanäle einer Multispektralkamera zu untersuchen. Dazu wurde zunächst ein Satz von virtuellen (Multispektral-) Kameras K_i , $3 \leq i \leq 16$, mit jeweils 3 bis 16 Kanälen generiert. Die spektralen Empfindlichkeiten wurden als gaussförmig verteilt angenommen, die äquidistant im

sichtbaren Bereich des Spektrums angeordnet sind, wobei sich benachbarte Kanäle gerade bei ihrer Halbwertsbreite überschneiden¹. Als Rekonstruktionsalgorithmus $K_{m,i}$ wurde jeweils die Wiener-Inverse [2, 3] berechnet, die eine häufig eingesetzte Methode der spektralen Rekonstruktion darstellt und für natürliche Spektren zu guten Ergebnissen führt.

Die Aufnahme und Rekonstruktion folgender Spektraldatensätze wurde untersucht:

- Vrhel-Datensatz [6] zur Bewertung der Rekonstruktion von natürlichen Spektren
- die den Spektralfarbenzug ergebenden Linienspektren zur Bewertung der Rekonstruktion von maximal gesättigten Farben
- die den Optimalfarbenkörper ergebenden Rechteckspektren zur Bestimmung des Kameragamuts

Der durch Aufnahme und Rekonstruktion resultierende transformierte Optimalfarbenkörper wurde anschließend durch einen Algorithmus zur Bestimmung der konvexen Hülle bearbeitet und resultiert im Kameragamut. Zum Zwecke einer verbesserten Visualisierung erlaubt der Algorithmus eine Projektion aller innenliegenden Punkte auf die Hülle, indem jeder Punkt entlang der Verbindungsgeraden mit dem Mittelpunkt nach außen verschoben wird.

Die vorgestellte Methode zur Bestimmung des Kameragamuts setzt voraus, daß nur lineare Operationen angewendet werden. Bei der spektralen Rekonstruktion können allerdings negative Anteile im Spektrum auftreten, die natürlich weder physikalisch sinnvoll sind, noch auf einem technisch realisierbaren Gerät reproduziert werden können. Im Interesse der Linearität des Systems dürfen sie jedoch nicht abgeschnitten oder anderweitig bearbeitet werden, sondern bleiben unangetastet. Das Abschneiden der negativen Anteile würde zudem eine Entsättigung der Farbe mit sich bringen, was dem Interesse an einem möglichst großen Kameragamut entgegensteht.

Ergebnisse

Vrhel-Datensatz Zunächst werden die Ergebnisse, die mit der herkömmlichen Methode ermittelt wurden, vorgestellt. Es wurde das Verhalten der Kamera und der spektralen Rekonstruktion für den Vrhel-Datensatz untersucht und der mittlere und der maximale Farbfehler, ausgedrückt in ΔE_{00} , zwischen originalelem und rekonstruiertem Datensatz berechnet. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse als Funktion der Zahl der Kanäle.

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\Delta E_{00,mean}$	8.16	2.45	0.56	0.15	0.16	0.1	0.06	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
$\Delta E_{00,max}$	33.21	20.39	3.67	0.5	0.78	0.55	0.25	0.19	0.15	0.15	0.16	0.17	0.18	0.16

Tab. 1: Mittlerer und maximaler Farbfehler in ΔE_{00} zwischen originalelem und rekonstruiertem Spektraldatensatz (Vrhel) als Funktion der Zahl der Kanäle n

Es ist zu erkennen, daß bereits ab einer Kanalzahl von 6 der maximale Fehler unter eins liegt. Tabelle 2 zeigt die entsprechenden Kennwerte, wenn dieselbe Untersuchung für die Spektren der Optimalfarben durchgeführt werden. In diesem Fall wird das Kriterium, daß sowohl der mittlere als auch maximale Fehler unter eins liegen, bis $n = 16$ überhaupt nicht erreicht. Zwar ist ab $n = 8$ der mittlere Fehler kleiner als eins, der maximale Fehler liegt jedoch noch immer weit darüber.

Dieser Umstand liegt in der Eigenschaft des Rekonstruktionsalgorithmus' begründet, daß er ausnützt, daß natürliche Spektren im allgemeinen einen glatten Verlauf haben und keine Sprungstellen aufweisen. Damit liegt

¹In vorausgehenden Simulationen wurde ermittelt, daß optimale Rekonstruktionsergebnisse erzielt werden, wenn die spektralen Empfindlichkeiten der Kanäle äquidistant im Spektrum angeordnet sind und sich etwa bei ihrer Halbwertsbreite schneiden. Dieser Konfigurationstyp führt bei der jeweiligen Kanalzahl zu den geringsten mittleren Farbabweichungen ΔE_{00} zwischen originalelem und rekonstruiertem Spektraldatensatz. Als Datensatz wurde der Vrhel-Satz [6] verwendet. Die Simulation mittels gaussförmigen Kanalempfindlichkeiten orientiert sich an den erhältlichen Interferenzfiltern [6, 7], die mit Gausskurven gut approximiert werden können.

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\Delta E_{00,mean}$	8.43	4.42	1.58	0.81	1.03	0.65	0.51	0.52	0.44	0.42	0.41	0.33	0.35	0.36
$\Delta E_{00,max}$	36.69	20.75	8.39	4.97	9.45	6.31	6.42	6.7	6.57	7.0	6.84	6.6	6.85	6.8

Tab. 2: Mittlerer und maximaler Farbfehler in ΔE_{00} zwischen Farborten des originalen und des rekonstruierten Optimalfarbenkörpers als Funktion der Zahl der Kanäle n

auf der Hand, daß Rekonstruktionen von Optimalfarben aufgrund ihrer scharfen Kanten zu schlechteren Ergebnissen führen. Es gilt allgemein, daß das Rekonstruktionsergebnis mit Steigerung der Sättigung schlechter wird.

Spektralfarbenzug Mit einer realen Kamera ist die Aufnahme des Spektralfarbenzugs mit verhältnismäßig großem Aufwand verbunden, da sehr schmalbandige Farbzeugs z.B. mit einem Laser erzeugt werden müssen. Aufgrund der Linearität des angesetzten Kamera- und Rekonstruktionsmodells ist jede reale, breitbandige Farbe als Superposition von Spektralreizen beschreibbar. Damit liefert die Form des transformierten Spektralfarbenzugs Aussagen besonders über die Rekonstruktion stark gesättigter, schmalbandiger Farben. In Abb. 2 werden die aus ausgesuchten Kameramodellen resultierenden transformierten Spektralfarbenzüge in der Normfarbtafel dargestellt.

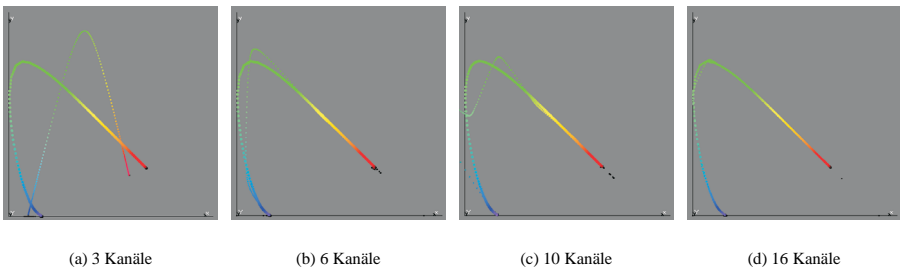
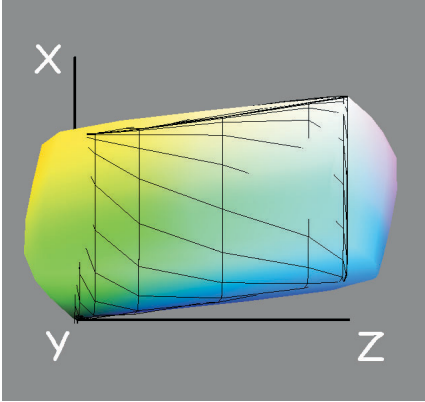


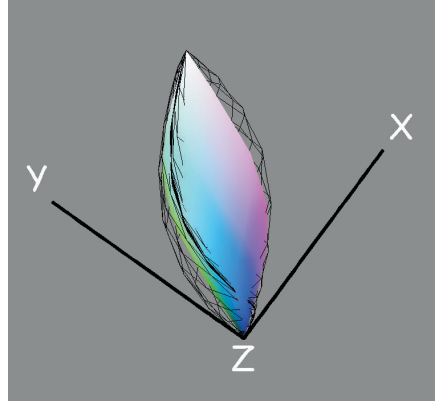
Abb. 2: Mit verschiedenen Kameramodellen rekonstruierte Spektralfarbenzüge (dünn gezeichnet) im Vergleich mit dem ursprünglichen Spektralfarbenzug (dick gezeichnet). Es können zum einen Farbwertanteile entstehen, die außerhalb des ursprünglichen Spektralfarbenzugs liegen (a), zudem kann der rekonstruierte Spektralfarbenzug konkav sein, so daß Mischfarben außerhalb desselben liegen können (c). Mit einer Kanalzahl von 16 (d) erhält man eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem originalen Spektralfarbenzug und dem transformiertem Spektralfarbenzug. Als Rekonstruktionsalgorithmus wird auch hier die Wiener-Inverse verwendet, die ursprünglich für die Rekonstruktion natürlicher Spektren optimiert wurde. Bei großer Kanalzahl liefert sie jedoch auch hier gute Ergebnisse.

Optimalfarbenkörper und Kameragamut Im folgenden wird die gefundene Abhängigkeit der Form des Kameragamuts von der Zahl der Kanäle angegeben. Allgemein gilt, daß die Übereinstimmung zwischen Gamut und Optimalfarbenkörper mit der Zahl der Kanäle steigt. Bei zu geringer Wahl der Zahl der Kanäle zeigen sich deutliche Abweichungen: stellenweise erreicht der Gamut nicht die Außenhaut des Optimalfarbenkörpers, woraus eine Entsättigung der aufgenommenen Farben resultiert, während er an anderen Stellen aus diesem herausragt, so daß physikalisch unsinnige Farbwerte generiert werden. Abb. 3 zeigt diese Fehler am Beispiel einer Kamera mit vier Kanälen im Normfarbraum.

Zur quantitativen Beschreibung der Diskrepanz zwischen Gamut und Optimalfarbenkörper werden die Farbkörper in den CIELAB-Farbraum transformiert und mit Ebenen konstanter Helligkeit geschnitten. Es ergeben sich Schnittbilder, wie sie in Abb. 4 dargestellt sind. Auf Basis dieser Schnittbilder werden die Volumina des

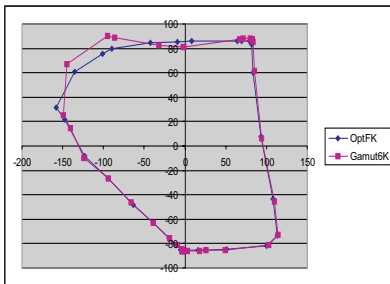


(a) Ansicht entlang der Y-Achse

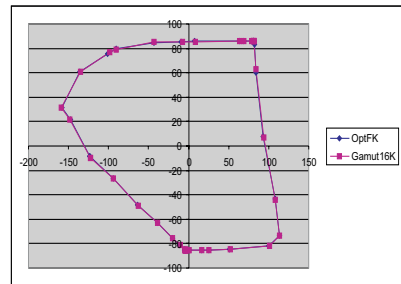


(b) Ansicht entlang der Z-Achse

Abb. 3: Ansichten eines Kameragamuts (farbig gezeichnet) und des Optimalfarbkörpers (Drahtgitter) im Normfarbraum. Stellenweise ragt der Gamut aus dem Optimalfarbkörper heraus, während er an anderen Stellen den Optimalfarbkörper nicht vollständig ausfüllt.



(a) 6 Kanäle



(b) 16 Kanäle

Abb. 4: Schnitte im CIELAB-Farbraum, hier in der Ebene $L = 50$, von Kameragamut und Optimalfarbkörper für $n = 6$ bzw. $n = 16$ Kanäle, wie sie für die Berechnung der Volumina und deren Überlappung verwendet wurden.

Optimalfarbkörpers und des Kameragamuts numerisch berechnet. Aus diesen Größen werden zwei Kriterien abgeleitet:

- $\frac{V_G \cap V_{OptFK}}{V_{OptFK}}$: Das Maß der Überlappung von Gamut und Optimalfarbkörper bezogen auf den Optimalfarbkörper. Es gibt an, wie groß der Anteil des Optimalfarbkörpers ist, der vom Kameragamut abgedeckt wird. Es sagt damit aus, wie gut die farbliche Rekonstruktion mit einem gegebenen Kamerasystem maximal sein kann. Ist im Extremfall überhaupt keine Überlappung vorhanden, kann keine einzige Farbe korrekt rekonstruiert werden. Ist 100%ige Überlappung vorhanden, so kann prinzipiell jede Farbe korrekt aufgenommen werden, wenn der Rekonstruktionsalgorithmus dazu in der Lage ist.

- $\frac{V_G}{V_{OptFK}}$: Das Volumen des Kameragamuts bezogen auf das des Optimalfarbenkörpers. Gerade bei Wahl einer zu geringen Kanalzahl kann der Gamut sogar größer als der Optimalfarbenkörper werden. Das bedeutet, daß potentiell physikalisch unsinnige Farbwerte generiert werden.

Sind Kamera und Rekonstruktion optimal gewählt, so haben beide Größen den Wert 100%, denn in diesem Falle sind Kameragamut und Optimalfarbenkörper gerade identisch.

Die Ergebnisse der Simulationen für die beiden Kriterien als Funktion der Kanalzahl sind in Tabelle 3 gegeben. Vor allem bei kleinen Kanalzahlen $n \leq 5$ zeigt sich die große Diskrepanz zwischen Kameragamut und Optimalfarbenkörper. Für $n = 4$ beispielsweise wächst der Gamut auf das 1.4-fache des Optimalfarbenkörpers an, während aber nur 92% des Optimalfarbenkörpers abgedeckt werden. Von einem solchen System würden für knapp 35% der Spektren eines gleichverteilten Spektraldatensatzes physikalisch unsinnige Farbwerte generiert.

Ab einer Kanalzahl von $n = 6$ stimmt das Volumen des Kameragamuts in etwa mit dem des Optimalfarbenkörpers überein, wobei die Überlappung noch nicht ausreichend ist. Erst ab einer Kanalzahl von 9 kann eine Überlappung von mindestens 99% erzielt werden.

n	3	4	5	6	7	8	9
$\frac{V_G \cap V_{OptFK}}{V_{OptFK}} [\%]$	70.23	92.41	96.66	97.9	97.79	98.83	99.66
$\frac{V_G}{V_{OptFK}} [\%]$	118.06	141.65	101.94	100.87	100.05	99.94	100.31
$p_{out} [\%]$	40.51	34.76	5.18	2.95	2.26	1.11	0.65

n	10	11	12	13	14	15	16
$\frac{V_G \cap V_{OptFK}}{V_{OptFK}} [\%]$	99.49	99.62	99.56	99.58	99.85	99.69	99.77
$\frac{V_G}{V_{OptFK}} [\%]$	100.19	100.34	100.03	100.07	100.38	100.02	100.21
$p_{out} [\%]$	0.7	0.71	0.47	0.49	0.54	0.34	0.44

Tab. 3: Überlappung von Kameragamut und Optimalfarbenkörper bezogen auf den Optimalfarbenkörper $\left(\frac{V_G \cap V_{OptFK}}{V_{OptFK}}\right)$ und Volumen des Kameragamuts bezogen auf den Optimalfarbenkörper $\left(\frac{V_G}{V_{OptFK}}\right)$ als Funktion der Zahl der Kanäle n . In der dritten Zeile ist jeweils die Wahrscheinlichkeit dafür angegeben, daß bei einem gleichverteilten Spektraldatensatz für ein bestimmtes Spektrum Farbwerte rekonstruiert werden, die außerhalb des Optimalfarbenkörpers liegen und somit physikalisch unsinnig sind.

Literatur

- [1] F. König: Die Charakterisierung von Farbsensoren, Dissertation, Aachen, 2001
- [2] St. Helling, E. Seidel, W. Biehlig: Multispektrale Farbbildrekonstruktion mit sieben Kanälen, Proc. 9. Workshop Farbbildverarbeitung, 2003, pp. 91-98
- [3] St. Helling, E. Seidel, W. Biehlig: Algorithms for Spectral Color Stimulus Reconstruction with a Seven-Channel Multispectral Camera, Proc. CGIV 2004, pp. 254-258
- [4] G. Sharma, W. Wu, E. Dalal: The CIEDE2000 Color-Difference-Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations, Color Research and Application 30, No. 1, 2005, pp. 21-30
- [5] J. Pujol, F. Martínez-Verdú, Estimation of the Device Gamut of a Digital Camera in Raw Performance Using Optimal Color-Stimuli, Proc. PICS 2003, pp. 530-535
- [6] M. Vrhel, R. Gershon, L. Iwan: Measurement and Analysis of Object Reflectance Spectra, Color Research and Application 19, No. 1, 1991, pp. 4-9
- [7] Andover Corporation: Optical Filter Guide