

Die Metamer-Randdeskriptor-Methode zur Farbkorrektur

Philipp Urban¹ und Rolf-Rainer Grigat²

¹ Ratio Entwicklungen GmbH

² Technische Universität Hamburg-Harburg, Vision Systems

1 Einleitung

Farbkorrektur beschreibt die Transformation zwischen den Sensorantworten eines Bildaufnahmesystems (z.B.: RGB) und dem CIEXYZ- bzw. CIEL*a*b* Farbraum. In jedem metameren Farbproduktionssystem ist dies die erste Farbtransformation nach der Bildaufnahme.

Es existieren zwei unterschiedliche Klassen von Methoden zur Farbkorrektur für lineare Bildaufnahmesysteme: Target- und modellbasierte Methoden. Targetbasierte Methoden benutzen eine Menge an Trainings- CIEXYZ / CIEL*a*b* Farben mit korrespondierenden Sensorantworten, um eine Approximation der Farbkorrekturabbildung zu bestimmen. Die am weitesten verbreitete Methode ist die lineare Transformation zwischen den Sensorantworten und dem CIEXYZ Farbraum. Falls die CIEXYZ Farben linear abhängig sind von den Sensorantworten ist diese Transformation optimal. In dieser Arbeit werden lineare Bildaufnahmesysteme mit $q \geq 3$ Kanälen und Sensorantworten aus der Menge $C := [0, 1]^q$ betrachtet. Die lineare Transformation wird durch eine $3 \times q$ Matrix A beschrieben, die mittels linearer Regression der Targetfarben bestimmt werden kann. Die Farbkorrekturabbildung lässt sich in diesem Fall wie folgt schreiben:

$$A \cdot c = (X, Y, Z)^T \rightarrow (L^*, a^*, b^*)^T, \quad (1)$$

wobei $c \in C$ eine beliebige Sensorantwort ist.

Da die Aufnahme- und Beobachtungslichtart i.A. differieren und gängige Bildaufnahmesysteme die Luther-Bedingung (d.h. die lineare Abhängigkeit der CIE-Normspektralwertkurven von den Kanalempfindlichkeiten, vgl. [9][6]) nicht erfüllen, ist die Farbkorrekturabbildung i.A. nicht linear und die Methode resultiert in großen ΔE Fehlern. Eine Verbesserung dieser Methode ist die Benutzung einer polynomialen Abbildung der Ordnung $p > 1$

$$\begin{bmatrix} P_X(c) \\ P_Y(c) \\ P_Z(c) \end{bmatrix} = (X, Y, Z)^T \rightarrow (L^*, a^*, b^*)^T, \quad (2)$$

wobei

$$P_x(c = (c_1, \dots, c_q)^T) = \sum_{i_1 + \dots + i_q \leq p} a_{(i_1, \dots, i_q)}^x \prod_{j=1}^q c_j^{i_j}, \quad (3)$$

für $x = X, Y, Z$. Die Koeffizienten $a_{(i_1, \dots, i_q)}^x$ lassen sich mittels mehrdimensionaler polynomialer Regression (**MPR**) der Targetfarben bestimmen.

In den beschriebenen Methoden wurde die Regression in den intensitätslinearen CIE X - Y - Z Farbraum durchgeführt. Dies minimiert lediglich den „Root Mean Square“ Fehler zwischen den transformierten Farben und den korrespondierenden Targetfarben und nicht dem Wahrnehmungsfehler. Da die Farbabstandsmetriken jedoch im CIE $L^*a^*b^*$ Farbraum definiert sind, ließe sich eine Verbesserung, im Sinne kleinerer ΔE Werte erwarten, wenn die Regression direkt in den CIE $L^*a^*b^*$ Farbraum durchgeführt werden würde.

Hardeberg [3] transformierte R, G, B Sensorantworten zuerst mit der nichtlinearen Funktion $g(x) = x^{1/3}$, um eine annähernd lineare Beziehung zwischen den $g(R), g(G), g(B)$ Werten und den CIE $L^*a^*b^*$ Farben zu erzielen. Dies führt zu kleineren ΔE Fehlern der anschließenden mehrdimensionalen polynomialen Regression. Der Grund für die Wahl von $g(x) = x^{1/3}$ liegt in der Abbildungsvorschrift zwischen dem CIE X - Y - Z und dem CIE $L^*a^*b^*$ Farbraum. Die Methode wird nachfolgend mit **MPRLabH** (MPR im CIE $L^*a^*b^*$ nach Hardeberg) abgekürzt. Eine Verallgemeinerung auf Systeme mit q Kanälen kann durch die kanalweise Transformation der Sensorantworten mittels $g(x)$ durchgeführt werden.

$$\begin{bmatrix} P_{L^*}(g(c_1), \dots, g(c_q)) \\ P_{a^*}(g(c_1), \dots, g(c_q)) \\ P_{b^*}(g(c_1), \dots, g(c_q)) \end{bmatrix} = (L^*, a^*, b^*)^T, \quad (4)$$

wobei $P_x, x = L^*, a^*, b^*$, analog zu Gleichung (3) definiert ist.

König [5] transformierte die Sensorantworten wie in Gleichung (1) und führte anschließend eine mehrdimensionale polynomialen Regression auf die in den CIE $L^*a^*b^*$ Farbraum konvertierten Targetfarben durch.

$$A \cdot c = (X, Y, Z)^T \rightarrow (\tilde{L}^*, \tilde{a}^*, \tilde{b}^*)^T \rightarrow \begin{bmatrix} P_{L^*}(\tilde{L}^*, \tilde{a}^*, \tilde{b}^*) \\ P_{a^*}(\tilde{L}^*, \tilde{a}^*, \tilde{b}^*) \\ P_{b^*}(\tilde{L}^*, \tilde{a}^*, \tilde{b}^*) \end{bmatrix} = (L^*, a^*, b^*)^T, \quad (5)$$

wobei $P_x, x = L^*, a^*, b^*$, analog zu Gleichung (3) definiert ist. Die Methode wird nachfolgend mit **MPRLabK** (MPR im CIE $L^*a^*b^*$ nach König) abgekürzt.

Wenn rauschbehaftete Systeme betrachtet werden, resultieren Regressionsmethoden in relativ großen Farbfehlern. König [5] propagierte in diesem Fall eine neue matrixbasierte Methode (vgl. Gleichung (1)). Die Koeffizienten der Matrix werden jedoch mittels linearer Programmierung bestimmt. Das Ziel besteht darin, Matrixeinträge zu berechnen, die ungefähr die gleiche Größenordnung besitzen und trotzdem zu kleinen Fehlerraten führen. Die resultierende Matrix verstärkt durch ihre Struktur Rauschen viel weniger als die regressionsbasierten Matrizen. Die Methode wird nachfolgend mit **RM** (Rauschstabile Matrizierung) abgekürzt.

Die andere Klasse von Methoden zur Farbkorrektur beinhaltet die modellbasierten Methoden. Diese Methoden benutzen das physikalische Modell des Bildaufnahmesystems (vgl. Gleichung (6)), um die CIE $L^*a^*b^*$ Farben aus den Sensorantworten zu rekonstruieren. Wie bereits angemerkt, unterscheidet sich i.A. die Beobachtunglichtart von der

Aufnahmelichtart und das Bildaufnahmesystem erfüllt die Luther-Bedingung nicht. Eine eindeutige Rekonstruktion der CIEL*a*b* Farben aus den Sensorantworten ist damit i.A. nicht möglich. Es existiert eine ganze Menge an Farben mit unterschiedlichen Reflexionsspektren, die zwar zur gleichen Sensorantwort führen (Gerätemetamerie), die jedoch unterschiedliche Farbeindrücke bei einem Beobachter unter der Beobachtungslichtart erzeugen.

Finlayson und Morovic [2] versuchten diesen sog. metameren Unterraum, der durch eine Sensorantwort aufgespannt wird, im CIEXYZ Farbraum zu charakterisieren. Hierzu nutzten sie lineare Programmierung, um den kleinsten Kubus zu finden, der den metameren Unterraum einschließt. Als Kandidaten für die Farbkorrektur wählten Sie den Schwerpunkt des Kubus. Die Methode wird nachfolgend mit **LPCC** (Linear Programming Centre of Cube) abgekürzt.

Ein Nachteil dieser Methode besteht darin, dass die Charakterisierung im intensitätslinearen CIEXYZ Farbraum durchgeführt wird und nicht im CIEL*a*b* Farbraum, in dem die Farbmetriken definiert sind. Außerdem ist die Charakterisierung des metameren Unterraumes durch einen einschließenden Kubus sehr grob.

Im folgenden Text wird eine Methode vorgestellt, die die Charakterisierung im quasi wahrnehmungsgleichabständigen CIEL*a*b* Farbraum mittels einer metameren Randdeskriptor-Matrix durchführt. Der Schwerpunkt der Matrixelemente wird als eine Approximation der optimalen Farbkorrektur im Sinne des kleinsten mittleren Fehlers gewählt (Dies ist die Farbe, die zu allen anderen möglichen Farben im metameren Unterraum den kleinsten ΔE Abstand besitzt).

2 Der metamere Unterraum einer Sensorantwort

Im Folgenden wird ein lineares Bildaufnahmesystem mit der folgenden Beziehung zwischen Aufnahmelichtart L_a , den Kanalempfindlichkeiten s_1, \dots, s_q , dem Reflexionsspektrum der Vorlage und der Sensorantwort $c = (c_1, \dots, c_q)^T \in C$ betrachtet, mit additivem Rauschen ϵ und den Empfindungswellenlängenbereich $\Lambda = [400\text{nm}, 700\text{nm}]$:

$$c_i = \int_{\Lambda} s_i(\lambda) L_a(\lambda) r(\lambda) d\lambda + \epsilon, \quad i = 1, \dots, q \quad (6)$$

Die korrespondierende diskrete Formulierung, durch Abtastung der Spektren an N äquidistanten Wellenlängen ist gegeben durch

$$c = \Omega_a r + \epsilon \quad (7)$$

mit $r = (r(\lambda_1), \dots, r(\lambda_N))^T$ und der Aufnahme-Lichtmatrix

$$\Omega_a = \begin{bmatrix} s_1(\lambda_1) L_a(\lambda_1) & \cdots & s_1(\lambda_N) L_a(\lambda_N) \\ \vdots & & \vdots \\ s_q(\lambda_1) L_a(\lambda_1) & \cdots & s_q(\lambda_N) L_a(\lambda_N) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Im folgenden Text sind die Sensorantwort $c \in C$, die Aufnahme-Lichtmatrix L_a und die Kanalempfindlichkeiten s_1, \dots, s_q bekannt. In der Praxis lassen sich die Kanalempfindlichkeiten durch Messung oder durch Nutzung einer Menge an Trainingsfarben rekonstruieren. Methoden hierzu sind beispielsweise die Pseudoinverse, die Wiener-Inverse

[8], Eigenvektormethode [3], Projektion auf konvexe Mengen [10], lineare Programmierung [5] oder quadratische Programmierung [1].

Der Farbeindruck $v_r \in \text{CIEXYZ}$, der durch ein Reflexionsspektrum r unter der Beobachtungslichtart L_v beim Beobachter entsteht, wird mathematisch analog wie beim Bildaufnahmesystem erzeugt. Hier soll gleich der diskrete Fall behandelt werden:

$$v_r = \Omega_v r \quad (9)$$

mit Ω_v als Beobachter-Lichtmatrix, die von den CIE Normspektralwertkurven $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ abhängt

$$\Omega_v = \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda_1)L_v(\lambda_1) \cdots \bar{x}(\lambda_N)L_v(\lambda_N) \\ \bar{y}(\lambda_1)L_v(\lambda_1) \cdots \bar{y}(\lambda_N)L_v(\lambda_N) \\ \bar{z}(\lambda_1)L_v(\lambda_1) \cdots \bar{z}(\lambda_N)L_v(\lambda_N) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Eine allgemeine Auflösung von Gleichung (7) nach dem Reflexionsspektrum r lautet

$$r = \Omega_a^\ominus(c - \epsilon) + \text{Kern}(\Omega_a) \quad (11)$$

wobei Ω_a^\ominus die Pseudoinverse von Ω_a ist und $\text{Kern}(\Omega_a) := \{w \mid \Omega_a w = 0\}$. Wenn eine Basis w_1, \dots, w_K von $\text{Kern}(\Omega_a)$ zu einer Matrix $W := (w_1, \dots, w_K)$ zusammengefasst wird, lässt sich (11) wie folgt umschreiben

$$r = \Omega_a^\ominus(c - \epsilon) + Wu, \quad \forall u \in \mathbb{R}^K \quad (12)$$

Die algebraische Lösung muss durch physikalische Restriktionen, wie Positivität, Beschränktheit und Glattheit, von natürlichen Oberflächenspektren beschränkt werden. Damit sind nicht alle $u \in \mathbb{R}^K$ physikalisch sinnvoll. All die $u \in \mathbb{R}^K$ in Gleichung (12), die die Bedingungen erfüllen, sollen zur Menge $U \subset \mathbb{R}^K$ zusammengefasst werden. Falls (12) in (9) eingesetzt wird, lässt sich der metamere Unterraum M_{XYZ}^c aller möglichen Farbeindrücke, die aus der Sensorantwort rekonstruiert werden können, angeben

$$M_{XYZ}^c = \{\Omega_v \Omega_a^\ominus(c - \epsilon) + \Omega_v Wu \mid u \in U\} \quad (13)$$

Da die Farbmatriken im CIEL*a*b* Farbraum definiert sind, müssen die Elemente von M_{XYZ} in den CIEL*a*b* transformiert werden. Im Folgenden soll die Farbraumtransformation von CIEXYZ nach CIEL*a*b* mit $\mathcal{L} : \text{CIEXYZ} \mapsto \text{CIEL*a*b*}$ bezeichnet werden. Der metamere Unterraum im CIEL*a*b* Farbraum wird wie folgt definiert

$$M_{Lab}^c = \mathcal{L}(M_{XYZ}^c) \quad (14)$$

3 Der metamere Rand-Deskriptor

Der in dieser Arbeit eingeführte metamere Randdeskriptor (**Metamer Boundary Descriptor**, **MBD**, vgl. Urban, Grigat [12]) ist eine $p \times q$ Matrix, die in jedem Eintrag einen Randpunkt des metameren Unterraumes M_{Lab}^c abspeichert. Jede Zeile enthält q Umrisspunkte der Menge für einen festen L^* -Wert. Die Randpunkte werden im CIEXYZ-Farbraum mit Hilfe der linearen Optimierungsaufgabe 1 berechnet, die den metameren Unterraum entlang der Halbgeraden $g + \lambda h, \lambda \geq 0$ abtastet (vgl. Abbildung 1a).

Aufgabe 1 Sei $\Omega_a \in \mathbb{M}(n \times N)$ die Aufnahme-Lichtmatrix für die Aufnahmelichtart L_a (vgl. Gleichung (8)) und $\Omega_v \in \mathbb{M}(3 \times N)$ die Beobachter-Lichtmatrix für die Beobachtungslichtart L_v definiert (vgl. Gleichung (10)). Ferner sei $c + \epsilon$ eine Sensorantwort mit additivem Rauschen ϵ . Finde

$$-\lambda = \min \quad (15)$$

unter den linearen Nebenbedingungen (Variablenerklärungen nachfolgend)

$$r \geq 0 \quad (16)$$

$$r \leq 1 \quad (17)$$

$$Hr \leq \rho \quad (18)$$

$$-Hr \leq \rho \quad (19)$$

$$\Omega_a r = c + \epsilon \quad (20)$$

$$\Omega_v r = v_r \quad (21)$$

$$g + \lambda h = v_r \quad (22)$$

$$\lambda \geq 0 \quad (23)$$

Nebenbedingung (16) sichert die Positivität der Reflexionsspektren, Nebenbedingung (17) garantiert ihre Beschränktheit, da von nicht-fluoreszierenden Oberflächen ausgegangen wird. Zusätzlich wird die Glattheitsbedingung in (18) und (19) benutzt. Hierbei ist $\rho > 0$ ein frei wählbarer Glattheitsfaktor und $H \in \mathbb{M}(N - 2 \times N)$ eine Konvolutionsmatrix, die die Aufgabe hat, die zweite Ableitung auf das Reflexionsspektrum r anzuwenden

$$H = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & & 0 \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \\ 0 & & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Durch die Nebenbedingung (20) wird sichergestellt, dass nur Reflexionsspektren r berücksichtigt werden, die zu der gegebenen Sensorantwort $c + \epsilon$ führen. Die Nebenbedingung (21) führt die CIE Normspektralwertkurven und die Beobachtungslichtart über die Matrix Ω_v ein. Hierbei ist die Farbwahrnehmung v_r eine Hilfsvariable, die für die nächste Nebenbedingung (22) benötigt wird. Diese Bedingung zusammen mit der Zielfunktion (15) und Bedingung (23) ermöglichen ein Abtasten des metameren Unterraumrandes entlang der bereits erwähnten Halbgerade. Für jede lineare Optimierungsaufgabe müssen die Parameter g und h , die die Halbgerade definieren, so gewählt werden, dass die Gesamtheit der Punkte im MBD den Rand von $M_{Lab}^c \subset CIELab$ gleichmäßig überdecken. Wie dies erreicht werden kann, wird in unserer Publikation [12] erläutert. Als Lösung der Aufgabe 1 wird ein physikalisch sinnvolles Reflexionsspektrum r zurückgegeben sowie die zugehörige Farbwahrnehmung v_r unter der Beleuchtung L_v . Diese Farbwahrnehmung entspricht dem Schnittpunkt der Halbgeraden mit dem Rand von M_{XYZ}^c und ist eindeutig, da alle in Aufgabe 1 vorkommenden Nebenbedingungen (16) - (23) eine konvexe Menge bilden, die bei entsprechend groß gewähltem Glattheitsfaktor $\rho > 0$ nicht leer ist. Dieser Schnittpunkt v_r wird anschließend

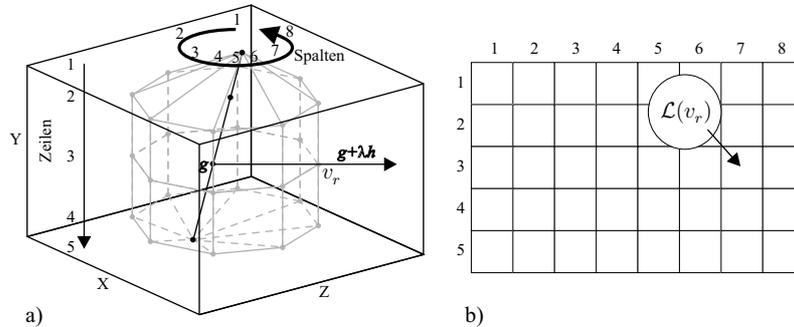


Abb. 1. a) Abtastung des metameren Unterraumes M_{XYZ}^c entlang der Halbgeraden $g + \lambda h$, $\lambda \geq 0$. b) Die korrespondierende MBD Matrix besitzt 8 Spalten und 5 Zeilen mit den in den *CIE Lab*-Farbraum transformierten Abtastpunkten.

in den *CIE Lab*-Farbraum transformiert und in der MBD Matrix abgespeichert. Bei verrauschten Systemen lässt sich das unbekannte additive Rauschen ϵ in der Nebenbedingung (20) als weitere Variable definieren, die durch zusätzlichen Nebenbedingungen eingeschränkt und additiv in der Zielfunktion gewichtet minimiert wird. Damit wird sichergestellt, dass auch im Rauschfall die durch die Nebenbedingungen definierte Menge nicht leer ist und damit eine Lösung garantiert. Ist die MBD Matrix bestimmt, so lässt sich ein guter Kandidat für die optimale Farbkorrektur hinsichtlich des kleinsten mittleren Fehlers durch die Wahl des Schwerpunktes der Matrixelement bestimmen.

4 Resultate und Diskussion

Die (MBD) Methode wurde mit den anderen Methoden, die in der Einleitung beschrieben worden sind, mit Hilfe von Simulationsexperimenten verglichen. Hierfür wurde ein Sony Sensor [11] und ein experimenteller 6 Kanalsensor aus Jülich [5] [4] mit den Empfindlichkeiten aus Abbildung 2 benutzt.

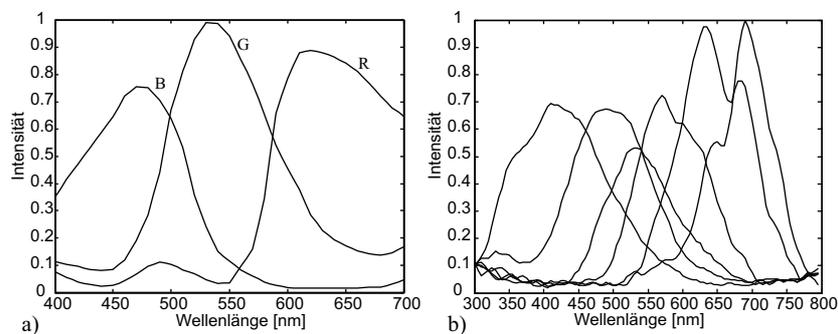


Abb. 2. Kanalempfindlichkeiten des a) Sony Sensors und b) 6 Kanalsensors aus Jülich

Als Aufnahmeleuchtart wurde CIE-**F11** gewählt, die der Charakteristik einer Leuchtstoffröhre entspricht. Als Beobachtungslichtarten wurden die folgenden CIE-Lichtarten gewählt: **A, C, E, D50, D65, F2, F11**. Als Testspektren wurden verschiedene Datenbanken mit Reflexionsspektren genommen. Vrhel Datenbank [13]: 64 Spektren von MUNSSELL-Chips, DUPONT: 120 Spektren von Dupont-Farb-Chips und OBJECTS: 170 Spektren natürlicher und künstlicher Oberflächen sowie ein spektral vermessenes IT8.7/2 Target [7] mit 288 Farbfeldern.

Für alle targetbasierten Methoden wurden 288 Farben eines weiteren IT8.7/2 Targets als Trainingsmenge genommen. Für die regressionsbasierten Methoden wurden Polynome der Ordnung 3 gewählt. Für den Sony Sensor mussten mit dieser Wahl 20 Koeffizienten und für den 6 Kanalsensor 84 Koeffizienten pro Polynom bestimmt werden. Die Basis der Reflexionsspektren, die für die **LPCC** Methode benötigt wird, bestand aus 8 Spektren, die 99.9% der Energie der Trainingsmenge enthielten.

Die Anzahl an Spalten in der MBD Matrix wurde auf $m = 8$ gesetzt. Die Anzahl an Zeilen ist variabel und hängt von der Luminanzspanne von M_{Lab}^c ab. Mit L_{max}^* und L_{min}^* dem größten und kleinsten L^* -Wert von M_{Lab}^c wird die Zeilenanzahl wie folgt gewählt

$$n = \text{Round} \left[2 \cdot (L_{max}^* - L_{min}^*) + \frac{1}{2} \right]. \quad (25)$$

Durch die Analyse verschiedener Datenbanken von Reflexionsspektren wurde der Glattheitsparameter auf $\rho = 0.0035$ gesetzt. Dieser Wert hängt von der Abtastung der Spektren, d.h. von N ab. In unserer Untersuchung wurde $N = 61$ gewählt, dies entspricht einer Abtastung in 5 nm Schritten.

In einer zweiten Simulation wurde additives, binäres, gleichverteiltes Rauschen auf die Sensorantwort gelegt. Die Rauschamplitude entsprach 1% der maximalen Sensorantwort.

Die Ergebnisse lassen sich den Tabellen 1 und 2 entnehmen.

	Rauschfrei			1% Rauschen		
	$E(\Delta E_{94}^*)$	$\text{Std}(\Delta E_{94}^*)$	$\text{Max}(\Delta E_{94}^*)$	$E(\Delta E_{94}^*)$	$\text{Std}(\Delta E_{94}^*)$	$\text{Max}(\Delta E_{94}^*)$
MBD	1.93	1.19	10.18	4.91	0.93	38.07
MPRXYZ	2.69	1.42	10.06	5.39	0.61	40.42
MPRLabH	2.71	1.47	9.89	5.34	1.35	51.20
MPRLabK	2.74	1.53	10.28	5.38	0.90	47.87
RM	4.26	2.60	17.42	5.97	2.65	40.94
LPCC	2.39	1.72	22.34	5.04	2.19	42.88

Tabelle 1. Ergebnisse für den Sony ICX434DQN Sensor. Werte beziehen sich auf alle Lichtarten und Testspektren.

Die Simulationsergebnisse für den Sony RGB Sensor zeigen, dass die **MBD** Methode, sowohl im rauschfreien als auch im verrauschten System, die anderen untersuchten Methoden an mittlerer Genauigkeit übertrifft. Die **MBD** Methode wird gefolgt von der **LPCC** Methode, deren mittlerer Fehler im rauschfreien Fall nahezu $\Delta E_{94}^* = 0.5$ größer

	Rauschfrei			1% Rauschen		
	$E(\Delta E_{94}^{**})$	$Std(\Delta E_{94}^{**})$	$Max(\Delta E_{94}^{**})$	$E(\Delta E_{94}^{**})$	$Std(\Delta E_{94}^{**})$	$Max(\Delta E_{94}^{**})$
MBD	1.10	0.93	22.27	5.98	5.11	35.19
MPRXYZ	0.75	0.61	11.06	45.97	32.11	167.98
MPRLabH	1.31	1.35	35.56	36.53	34.91	240.73
MPRLabK	0.93	0.90	27.83	14.72	12.46	112.02
RM	3.87	2.65	18.35	6.31	3.99	36.94
LPCC	2.20	2.19	14.95	17.18	12.69	86.60

Tabelle 2. Ergebnisse für den 6 Kanalsensor. Werte beziehen sich auf alle Lichtarten und Testspektren. Die MPR Methoden sind extrem rauschempfindlich und in diesem Fall für das verrauschte System nicht anwendbar.

ist. In dieser Simulation erzielen die **MPR** Methoden, deren Polynomordnung jeweils 3 entspricht, annähernd gleiche Ergebnisse. Es zeigt sich kein Vorteil durch Nutzung des CIEL*a*b* Farbraumes zur Regression. Die **RM** Methode resultiert in den größten mittleren Fehlern für beide untersuchten Rauschlevel.

Für den 6 Kanalsensor aus Jülich bietet sich ein ganz anderes Bild. In der rauschfreien Simulation erzielen die **MPR** Methoden extrem kleine mittlere Fehler, die im Falle der **MPRXYZ** und **MPRLabK** Methode sogar etwas unter den der **MBD** Methode liegen. Dieses Verhalten ändert sich jedoch unter dem Einfluß von Rauschen. Die Terme höherer Ordnung der verwendeten Polynome verstärken die Rauschfehler extrem. Von einem Einsatz dieser Methoden ist deshalb bei verrauschten mehrkanaligen Bildaufnahmesystemen abzuraten. Die **LPCC** Methode liegt bei den Ergebnissen für das rauschfreie System im unteren Mittelfeld der untersuchten Methoden. Im Rauschfall führt diese Methode zu unakzeptabel großen Fehlern. Ursache hierfür ist das Fehlen jeglicher Rauschbetrachtung in den linearen Optimierungsaufgaben. Die durch die Nebenbedingungen definierte Menge kann dadurch in einigen Fällen leer sein, was dazu führt, dass die Methode keine vernünftigen Ergebnisse mehr liefern kann. Die **RM** Methode ist im rauschfreien Fall, ähnlich wie beim Sony RGB Sensor, die schlechteste der analysierten Methoden. Ihre Stärke offenbart diese Methode erst in der Rauschsimulation. Die Fehler sind deutlich kleiner als bei den **MPR** Methoden und nur unmerklich größer als bei der **MBD** Methode.

5 Zusammenfassung

Eine neue modellbasierte Methode zur Farbkorrektur wurde vorgestellt und mit anderen Methoden durch Simulationsexperimente verglichen. Die neue Methode charakterisiert den metameren Unterraum der Sensorantwort im CIEL*a*b* Farbraum durch die Berechnung einer metameren Randdeskriptormatrix. Durch die Berechnung des Schwerpunktes lässt sich eine gute Approximation der optimalen Farbkorrektur hinsichtlich des kleinsten mittleren Fehlers bestimmen. Zusammenfassend lässt sich aus den Simulationsergebnissen die interessante Schlußfolgerung ziehen, dass die **MBD** Methode sowohl in nahezu rauschfreien als auch in verrauschten Systemen zu den genauesten Methoden zählt. Andere Verfahren erzielen lediglich in einem dieser Fälle gute Ergebnisse.

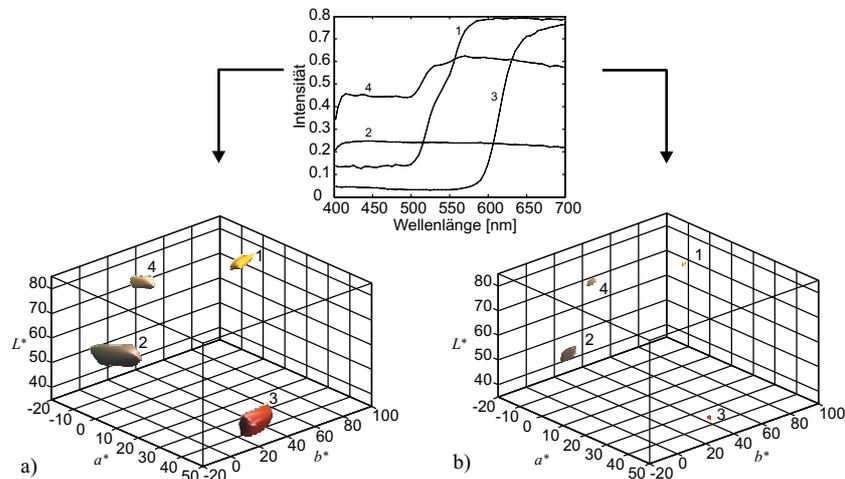


Abb. 3. Beispiele einiger Munsell-Spektren mit zugehörigen metameren Unterräumen, unter der Beobachtungsbeleuchtung CIE-F2 und Aufnahmebeleuchtung CIE-F11, berechnet für a) den Sony ICX434DQN Sensor [11] und b) den 6 Kanalsensor aus Jülich [5] [4].

Literatur

1. G. D. Finlayson, S. Hordley, and P. M. Hubel. Recovering device sensitivities with quadratic programming. In *IS&T/SID*, pages 90–95, Scottsdale Ariz., 1998.
2. G. D. Finlayson and P. M. Morovic. Metamer constrained color correction. *Journal of Imaging Science and Technology*, 44:295–300, 2000.
3. J. Y. Hardeberg. *Acquisition and reproduction of colour images: colorimetric and multispectral approaches*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications, France, 1999.
4. P. G. Herzog, D. Knipp, H. Stiebig, and F. König. Colorimetric characterization of novel multiplechannel sensors for imaging and metrology. *Journal of Electronic Imaging*, 8:342–353, 1999.
5. F. König. *Die Charakterisierung von Farbsensoren*. PhD thesis, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Deutschland, 2001.
6. F. König and P. G. Herzog. On the limitations of metameric imaging. *PICS: Image Processing, Image Quality, Image Capture, Systems Conference*, pages 163–168, 1999.
7. NPES. *Graphic technology - color reflection target for input scanner calibration*, volume IT8.7/2-1993. Reston, Virginia, 1999.
8. W. K. Pratt. *Digital Image Processing*, volume 2. John Wiley & Sons, inc., 1991.
9. G. Sharma. *Digital Color Imaging Handbook*. CRC PRESS, USA, 1 edition, 2003.
10. G. Sharma and H. J. Trussell. Characterization of scanner sensitivity. In *IS&T/SID*, pages 103–107, Scottsdale Ariz., 1993.
11. Sony. Icx434dqn, diagonal 5.68mm (type 1/3.2) frame readout ccd image sensor with square pixel for color cameras. *Datasheet*.
12. P. Urban and R.-R. Grigat. Color correction by calculating a metamer boundary descriptor. In *CGIV*, pages 536–541, Aachen, Germany, 2004.
13. M.J. Vrhel, R. Gershon, and L.S. Iwan. Measurement and analysis of object reflectance spectra. *Color Research and Applications*, 19:4–9, 1994.