




Carsten Büttner



**Spektrale Charakterisierung von
Farbbildsensoren zur anwendungs-
spezifischen Kameraparametrierung**



Cuvillier Verlag Göttingen

Spektrale Charakterisierung von Farbbildsensoren zur anwendungsspezifischen Kameraparametrierung

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
im Fach Informatik

eingereicht an der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II
der Humboldt-Universität zu Berlin

von

Diplom-Ingenieur (FH) Carsten Büttner, Master of Science,
geboren am 11.01.1978 in Göttingen

Präsident der Humboldt-Universität zu Berlin
Prof. Dr. Christoph Marksches

Dekan der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II
Prof. Dr. Wolfgang Coy

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. Beate Meffert
2. Prof. Dr.-Ing. Klaus Bobey
3. Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Gall

Tag der Verteidigung: 12. Februar 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2008

Zugl.: Berlin, Univ., Diss., 2008

978-3-86727-550-7

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2008

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2008

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86727-550-7

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK), Fakultät Naturwissenschaften und Technik in Göttingen und wurde in den Jahren 2006 und 2007 während meines Berufslebens bei der Firma Kappa opto-electronics GmbH in Gleichen fortgeführt. Für die Hilfe zur Entstehung dieser Arbeit bin ich einigen Menschen zu Dank verpflichtet.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer, Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Bobey, für seine Anregungen zu dieser Arbeit und die zahlreichen fruchtbaren Diskussionen. Seine kritischen Hinweise und Denkanstöße haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Des Weiteren möchte ich mich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Beate Meffert für ihr Interesse an meinem Thema bedanken und für die angenehme Zusammenarbeit mit ihrer Arbeitsgruppe „Signalverarbeitung und Mustererkennung“ an der Humboldt-Universität zu Berlin.

Bei allen Mitarbeitern der Firma Kappa opto-electronics GmbH bedanke ich mich für ihre Hilfestellungen und stete Diskussionsbereitschaft. Namentlich möchte ich in erster Linie Herrn Dr.-Ing. Bernd Schlichting erwähnen, der meine Arbeit von der Idee bis zum heutigen Stand mit Rat und Tat begleitet hat. Ebenso danke ich Herrn Dr. Janko Verhey für das intensive Korrekturlesen meiner Arbeit. Außerdem gilt mein Dank dem Geschäftsführer, Herrn Haese, und dem Entwicklungsleiter, Herrn Zimmer, für die flexible Arbeitszeitgestaltung, die mir stets eine abwechslungsreiche Arbeit zwischen Entwicklung und Forschung ermöglichte.

Den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Sensortechnik, allen voran den Herren Robert Burdick, Lutz Brekerbohm und Markus Kochta, danke ich für alle mir zu teil gewordene Unterstützung und das freundliche Arbeitsklima während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der HAWK.

Herrn Dr.-Ing. Udo Krüger danke ich für viele anregende Fachgespräche und die zur Verfügung gestellten Messergebnisse basierend auf der von ihm entwickelten Spektrometermethode. Seine Denkanstöße haben maßgeblich zu einigen inhaltlichen Vertiefungen in der Charakterisierung von Bildaufnahmesystemen beigetragen.

Und schließlich gilt mein Dank natürlich meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht und mich stets unterstützt haben, und meiner Freundin, die Geduld bewiesen und mir des Öfteren den Rücken für die Arbeit freigehalten hat.

Wiesbaden im September 2007

Carsten Büttner

Kurzfassung

Die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit eines Farbbildaufnahmesystems, beispielsweise einer digitalen Kamera, ist eine wichtige Voraussetzung für die modellbasierte Anpassung der Farbkorrektur an die Beleuchtungsbedingungen in speziellen Anwendungen oder zur Generierung von Geräteprofilen für ein Farbmanagementsystem.

In dieser Arbeit wurde erstmalig ein Verfahren zur indirekten Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit entwickelt, in die Praxis umgesetzt und untersucht, welches auf einem geringen mittels Optimierungsmethoden selektierten Farbprobensatz basiert. Das indirekte Verfahren besitzt gegenüber einem direkten die Vorteile, dass die verwendeten breitbandigen Farbproben zu einer vergleichsweise höheren Strahlungsleistung am Bildsensor führen, dass diese Proben eher den im praktischen Einsatz auftretenden Bedingungen entsprechen und dass das Verfahren in der Umsetzung kostengünstiger ist. Ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung des indirekten Messverfahrens liegt in der neuen Methode zur automatischen Selektion der für das Verfahren am besten geeigneten Farbproben. Dieser als Lagrange-Multiplikator-Methode bezeichnete Ansatz zur Selektion basiert auf einer analytischen Untersuchung des quadratischen Optimierungsproblems und liefert einen optimalen Probensatz für die gewählte Messaufgabe. Die Ergebnisse des indirekten Verfahrens wurden denen eines direkten Verfahrens gegenübergestellt. Die beiden Ergebnisse weisen eine sehr hohe Ähnlichkeit auf und können im Rahmen der Messungenauigkeit als identisch betrachtet werden. Eine weitere Bestätigung der Ergebnislage wurde durch einen Vergleich basierend auf einem Testfarbprobensatz geliefert. Die gezeigten Resultate qualifizierten das entwickelte indirekte Messverfahren zum Einsatz in der täglichen Praxis. Dabei ließ sich der zusätzliche Vorteil eines geringen Kalibrierungsaufwands nachweisen.

Als weiterer Kernpunkt wurden neue Methoden zur modellbasierten Optimierung von Farbkorrektur-Transformationen entwickelt und bisherigen Ansätzen aus der Literatur gegenübergestellt. Das angesetzte spektrale Modell erlaubt unter Nutzung der indirekt bestimmten Empfindlichkeiten eine hohe Flexibilität in der Berücksichtigung realer Lichtquellen, definierter Normlichtarten, Testkarten und vermessener realer und generierter virtueller Objektspektren zur optimalen Anpassung der Farbproduktion an bestimmte Anwendungsbedingungen. Um neben der Farbtreue auch die Wirkung einer Transformation auf das Signal-Rausch-Verhältnis in den Bilddaten zu optimieren, wurde ein neuer Ansatz zur Integration einer empfindungsgemäßen Bewertung des Rauschens in die quadratische Optimierung präsentiert. Des Weiteren wurde eine neue als Triplematrix bezeichnete Methode zur optimalen Farbkorrektur für mehrere und variierende Aufnahmebeleuchtungen vorgestellt. Zur dynamischen Anpassung der Farbkorrektur, einem automatischen Weißabgleich, lässt sich die Triplematrix in direkter Verbindung mit verschiedenen veröffentlichten Farbkonstanzalgorithmen nutzen. Die praktische Anwendbarkeit der entwickelten Methoden wurde beispielsweise anhand eines Dermatoskopiesystems gezeigt.

Schlagwörter: Spektrale Charakterisierung, Bildsensor, Kamera, Farbkorrektur, Farbmanagement

Abstract

The determination of the spectral sensitivity of a color image acquisition system, for example a digital camera, is an important prerequisite for the model-based adaptation of color correction mechanisms to the illumination conditions in special applications or for the generation of device profiles for a color management system.

This dissertation is the first work focused on developing, realizing and analyzing a procedure for the indirect determination of spectral sensitivities based on color samples selected by an optimization method. Compared to a direct procedure, the indirect procedure has three main advantages: The used broadband color samples lead to comparably higher intensities at the image sensor, these samples correspond better to real application conditions, and the procedure is more cost-effective. The new method for an automated selection of the color samples which are the most suitable for the procedure is an essential contribution to the improvement of the indirect measurement. This selection approach is called Lagrange multiplier method. It is based on an analysis of the quadratic optimization problem and it delivers an optimal set of color samples for a specific measurement task. After comparing the results of the indirect measurement procedure with those of a direct one, both results show a high degree of similarity and can be considered equal within the scope of measuring inaccuracies. Another confirmation is given by a comparison based on a test set of color samples. The presented results qualify the developed indirect measurement procedure for daily practical operation. Herewith, the additional advantage of a small calibration effort was shown.

As an additional key topic, new methods for the model based optimization of color correction transformations were developed and compared to existing approaches described in the literature. The set up of the spectral model allows under usage of the indirectly determined sensitivities for a high degree of flexibility. This flexibility considers real light sources, standard illuminants, test charts, and measured real and generated virtual object spectra for optimizing the color reproduction under specific application conditions. A new approach is presented to integrate a perception-oriented noise valuation into the quadratic optimization problem for optimizing not only the color fidelity but also the transformations impact on the signal-to-noise ratio of the image data. Furthermore, a new method called triple matrix is introduced, enabling an optimized color correction for multiple and varying acquisition illuminants. The triple matrix is directly applicable together with different published color constancy algorithms for dynamic adaptations known as automatic white balancing. It is shown, for example on a dermatoscopy setup, that the developed algorithms are applicable to practical circumstances.

Key words: spectral characterization, image sensor, camera, color correction, color management

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung / Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	V
Notationen, Formelzeichen und Abkürzungen	IX
1 Einführung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Einordnung und Ziel	2
1.3 Aufbau der Arbeit	4
2 Grundlagen der Farbbildsensorik	5
2.1 Entstehung und Bewertung von Licht	6
2.1.1 Strahlungsquellen und Lichtarten	6
2.1.2 Radiometrie und Fotometrie	7
2.1.3 Farbmessstechnik	9
2.2 Bildsensoren und Signalwandlung	11
2.2.1 Progressive-Scan Interline-Transfer CCD	12
2.2.2 Fotodiode	13
2.2.3 CCD-Signalprozessor	15
2.2.4 Modell des Signalpfads	17
2.2.5 Modell zum Rauschen	19
2.3 Bestimmung ausgewählter Kamerakennwerte	21
2.3.1 Dunkelsignal und Dynamik	21
2.3.2 Hellsignal und Fullwell-Kapazität	22
2.3.3 Nichtlinearität	23
2.4 Verfahren zur spektralen Trennung	24
2.5 Modell der Bildaufnahme	26
3 Grundlagen zur Optimierung der Farbbildreproduktion	27
3.1 Farbraumspezifische Gerätecharakterisierung	28
3.1.1 Trichromatische Bildaufnahmesysteme	28
3.1.2 Selbstleuchtende Wiedergabegeräte	30

3.2	Mathematische Ansätze zur Farbkorrektur	32
3.2.1	Zielstellung	32
3.2.2	Chromatische Adaption	32
3.2.3	Abbildungsfunktionen	33
3.3	Spektrale Anpassung	35
3.4	Gütekriterien	37
3.4.1	Integraler Fehler	37
3.4.2	Farbqualitätsfaktor	38
3.4.3	Farbabstandsformeln	39
3.4.4	Bewertung von Farbrauschen	40
3.5	Optimierungswerkzeuge	41
3.5.1	Methode der kleinsten Quadrate	41
3.5.2	Inverse Verfahren	42
3.5.3	Lineare Optimierung	43
3.5.4	Quadratische Optimierung	44
4	Indirekte Bestimmung der spektralen Kameraempfindlichkeit	45
4.1	Simulationsmodell zur indirekten Spektralmessung	46
4.2	Methoden zur indirekten Spektralmessung	47
4.2.1	Inverse Verfahren	48
4.2.2	Lineare Optimierung	49
4.2.3	Quadratische Optimierung	52
4.2.4	Lagrangesche Multiplikatorenregel	54
4.2.5	Diskussion	55
4.3	Methoden zur Farbfilterauswahl	56
4.3.1	Bewertungskriterium	56
4.3.2	Standardtestkarten	57
4.3.3	Singulärwertmethode	58
4.3.4	Lagrange-Multiplikator-Methode	59
4.3.5	Diskussion	61
4.4	Verfahren zur Bewertung der Messergebnisse	61
4.4.1	Normierte Farbvektordifferenz	61
4.4.2	Chromatischer Abstand	62
4.4.3	Farbabstandsformeln	63
4.4.4	Diskussion	63
5	Messung der spektralen Kameraempfindlichkeit	65
5.1	Bestimmung des Pixel-Übertragungsverhaltens	65
5.2	Indirekte Messmethode	67
5.2.1	Farbkameramessplatz	67

5.2.2	Ergebnisse	70
5.3	Direkte Messmethode	73
5.3.1	Messaufbau	74
5.3.2	Ergebnisse	75
5.4	Gütetest	76
5.5	Diskussion	78
6	Modellbasierte Optimierung der Farbkorrektur	81
6.1	Einführung	81
6.2	Methoden zur optimalen Matrizierung	82
6.2.1	Methode der kleinsten Quadrate	83
6.2.2	Lineare Optimierung	83
6.2.3	Quadratische Optimierung	84
6.2.4	Diskussion	85
6.3	Rauschstabile Matrizierung	86
6.3.1	Optimierung der Kanaldifferenz	87
6.3.2	Optimierung der Quadratsumme	87
6.3.3	Empfindungsgemäße Optimierung	88
6.3.4	Diskussion	88
6.4	Optimale Multi-Beleuchtungs-Matrizierung	90
6.4.1	Doppelmatrix	90
6.4.2	PCA-basierte Farbkorrektur-Methode	91
6.4.3	Triplematrix	92
6.4.4	Algorithmen zur dynamischen Anpassung	94
6.4.5	Diskussion	95
6.5	Anwendungsspezifische Parametrierung	97
7	Zusammenfassung und Ausblick	101
	Literaturverzeichnis	103

Notationen, Formelzeichen und Abkürzungen

Zum besseren Verständnis der in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen und Ergebnisse werden nachfolgend die verwendeten Notationen, Formelzeichen und Abkürzungen erläutert.

Notationen

Funktionen und Mengen. Eine Funktion $f(x)$ bildet eine beliebige Variable $x \in \mathbb{R}$ auf einen kontinuierlichen Wertebereich, z. B. die Menge der positiven reellen Zahlen \mathbb{R}^+ ($f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^+$) oder einen diskreten Wertebereich ab. Diskrete Wertebereiche erfordern ganzzahlige Wertemengen, welche mit einem Unterstrich gekennzeichnet werden (z. B. $\underline{M} \subset \mathbb{Z}$). Ein Bild wird als zweidimensionale Funktion $f(i, j)$ notiert, die jedes Bildelement (Pixel) auf die Grauwertmenge \underline{G} oder im Falle eines RGB-Farbbilds auf die RGB-Farbwertmenge $\underline{R} \times \underline{G} \times \underline{B} = \underline{G}^3$ abbildet. Diese Mengen können zusätzlich mit der Bittiefe d gekennzeichnet werden (${}^d\underline{G} = \{0, 1, 2, \dots, 2^d - 1\}$). In dieser Arbeit wird das Wertepaar (i, j) für die diskreten Koordinaten zur Adressierung einer Matrix (z. B. eines Bildes) verwendet.

Matrizen und Vektoren. Für Matrizen werden Großbuchstaben (z. B. **A**) und für Vektoren Kleinbuchstaben (z. B. **b**) im Fettdruck verwendet. Die Elemente werden mit den jeweiligen Kleinbuchstaben und Indizes bezeichnet. Ein Spaltenvektor wird auch als $N \times 1$ -Matrix und ein Zeilenvektor als $1 \times N$ -Matrix bezeichnet. Ein Farbbild wird als dreidimensionale Matrix $\mathbf{F}(i, j, k)$ mit den Farbkomponenten k beschrieben.

In der Farbmatrik werden häufig Integrale von wellenlängenabhängigen Funktionen verwendet. Die Messung eines Spektrums kann aber nur abgetastet erfolgen und auch die Berechnung ist mit begrenztem Zeitaufwand nur wertdiskret möglich. Deshalb werden im numerischen Teil dieser Arbeit anstatt Spektralfunktionen Vektoren benutzt. Damit geht beispielsweise ein kontinuierliches Reflexionsspektrum $\beta(\lambda)$ in einen diskreten Vektor über:

$$\beta(\lambda) \rightarrow \beta(\lambda_i) \rightarrow \boldsymbol{\beta} = [\beta(\lambda_1), \beta(\lambda_2), \dots, \beta(\lambda_i), \dots, \beta(\lambda_N)]^T \quad (0.1)$$

Entsprechend gehen die Integrale in Summen über.

Symbole und Operationen. Die folgenden Symbole und damit verbundene Rechenoperationen finden in dieser Arbeit Verwendung

$\sum \mathbf{x}$	Summe der N Elemente eines Vektors $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$
$\bar{\mathbf{x}}$	Mittelwert eines N-elementigen Vektors \mathbf{x} mit $\bar{\mathbf{x}} := \frac{1}{N} \sum \mathbf{x}$
$\ \mathbf{x}\ $	kartesische Norm eines Spaltenvektors \mathbf{x} mit $\ \mathbf{x}\ := (\sum x^2)^{0.5} = \sqrt{\mathbf{x}^T \cdot \mathbf{x}}$
Spur (\mathbf{X})	Summe der Hauptdiagonalelemente einer quadratischen Matrix \mathbf{X}
$\ \mathbf{A}\ _F$	Frobenius-Norm einer Matrix \mathbf{A} mit $\ \mathbf{A}\ _F := (\text{Spur}(\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}))^{0.5}$
$\mathbf{A}^{(i)}$	Zeile i einer Matrix \mathbf{A}
\mathbf{A}^T	Transponierte einer Matrix \mathbf{A}
\mathbf{X}^{-1}	Inverse einer quadratischen Matrix \mathbf{X}
$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$	gewöhnliches Produkt der Matrizen \mathbf{A} und \mathbf{B}
$\mathbf{A} * \mathbf{B}$	elementweise Multiplikation der Matrizen \mathbf{A} und \mathbf{B}
$\mathbf{X} = \text{diag}(\mathbf{x})$	Erzeugung einer Diagonalmatrix \mathbf{X} aus einem Vektor \mathbf{x}
\forall	für alle
<i>s.t.</i>	subject to (unter der/den Nebenbedingung/en)

Formelzeichen

\mathbf{A}	3×3 - Matrix zur linearen Farbraumtransformation (Farbkorrekturmatrix)
\mathbf{A}_W	3×3 - Matrix zur Transformation von CIEXYZ zum Wiedergabefarbraum
\mathbf{A}_Y	1×3 - Matrix zur Transformation vom Wiedergabefarbraum zu Y
A	Index zur Kennzeichnung des Aufnahme farbraums
A_N	Numerische Apertur
$\alpha(\lambda)$	spektraler Absorptionskoeffizient
$\beta(\lambda)$	spektraler Reflexionsgrad
β	$N \times 1$ - Matrix (Spaltenvektor) mit $\beta(\lambda_i)$
\mathbf{B}	$N \times O$ - Matrix mit O Objektspektren $\beta(\lambda_i)$
c	Vakuum-Lichtgeschwindigkeit $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
C	Kapazität in Farad $F = \text{As/V}$
\mathbf{C}	$N \times O$ - Farbprobenmatrix mit $\mathbf{C} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{B}$
d	Bitbreite eines digitalen Werts
D	digitaler Wert in LSB (Grauwert)
D_{ref}	Dunkelreferenzwert in LSB
\mathbf{D}	Diagonalmatrix
δ, Δ	Differenzen als Hilfsgröße in der Optimierungsrechnung
ΔE_{ab}	Farbabstand in CIELAB nach Formel CIE 1976
ΔE_{94}	Farbabstand in CIELAB nach Formel CIE 1994
$D(\lambda)$	spektrale Dämpfung

e_{rg}	chromatischer Abstand
e_{RGB}	normierte Farbvektordifferenz
E_e	Bestrahlungsstärke
E_{ph}	Energie eines Photons
E	Einheitsmatrix
$\eta(\lambda)$	spektraler Quantenwirkungsgrad
$\varphi_\lambda(\lambda)$	(spektrale) Farbreizfunktion [DIN79]
F	$N \times N$ - Diagonalmatrix eines optischen Filters mit $\tau(\lambda_l)$
G	Verstärkungsfaktor
h	Plancksche Konstante $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js
i, j	Zeilen-, Spaltenindex von Matrizen (Bildern)
I, J	Anzahl der Zeilen i , Spalten j einer Matrix (Bildgröße)
k	Index für die spektralen Kanäle einer Kamera
K	Anzahl der spektralen Kanäle einer Kamera
K_{sys}	Systemübertragungsfaktor einer Kamera
L	Lagrange-Multiplikator
λ	Wellenlänge
M	3×3 - Transformationsmatrix von CIEXYZ zu LMS
M _{CAT02}	3×3 - Transformationsmatrix nach CIECAM02
M _{HPE}	3×3 - Transformationsmatrix nach Hunt-Pointer-Estevez
μ_e	mittlerer Signalwert in Elektronen e^-
μ_y	mittlerer Signalwert in LSB (Grauwert)
$\mu_{y,dark}$	mittlerer Dunkelsignalwert in LSB
n_e	Anzahl von Ladungsträgern (Elektronen e^-)
$n_{e,FW}$	Full-Well-Kapazität eines Sensors in Elektronen e^-
n_p	Anzahl von Photonen
N	Anzahl der Stützstellen über die Wellenlänge
O	Anzahl der verwendeten Farbproben (Objekte)
ω, Ω	Gewichtungsfaktoren
$p\%$	Maß für SNR-Veränderung von Aufnahme zu Wiedergabe
P	Anzahl an Simulationsläufen
q	Elementarladung
r, g	Farbwertanteile im RGB-Farbraum (chromatische Koordinaten)
r_k	Signalreaktion des Farbkamerakanals k
r	$K \times O$ - Matrix mit Reaktionswerten eines mehrkanaligen Sensors
r _{RGB}	$3 \times O$ - Matrix mit Reaktionswerten eines RGB-Farbsensors
$S(\lambda)$	spektrale Strahlungsleistungsverteilung einer Lichtquelle
S	$N \times N$ - Diagonalmatrix mit $S(\lambda_l)$
$s_k(\lambda)$	spektrale Empfindlichkeit des Farbkamerakanals k

\mathbf{s}	$N \times K$ - Matrix mit $s_k(\lambda_l) \forall k$
\mathbf{s}_{RGB}	$N \times 3$ - Matrix mit spektraler Empfindlichkeit eines RGB-Farbsensors
\mathbf{s}_{XYZ}	$N \times 3$ - Matrix mit $\bar{x}(\lambda_l), \bar{y}(\lambda_l), \bar{z}(\lambda_l)$
σ	Standardabweichung
σ_e	Standardabweichung in einer Anzahl von Elektronen e^-
σ_y	Standardabweichung in LSB
σ_{dark}	Standardabweichung im Dunkelsignal
σ_p	Standardabweichung durch Photonenrauschen
σ_{PRNU}	Standardabweichung durch Hellsignalungleichförmigkeit
σ^2	Varianz
Σ	Kovarianzmatrix
\mathbf{t}	$3 \times O$ - Matrix mit Farbwerttripeln zu O Objekten
\mathbf{t}_A	$3 \times O$ - Matrix mit Farbwerttripeln eines Aufnahmefarbraums
$\mathbf{t}_{A,ref}$	3×1 - Matrix mit Farbwerttripel bei Aufnahmebeleuchtung (Weißreferenz)
\mathbf{t}_W	$3 \times O$ - Matrix mit Farbwerttripeln eines Wiedergabefarbraums
$\mathbf{t}_{W,ref}$	zu $\mathbf{t}_{A,ref}$ korrespondierendes Farbwerttripel im Wiedergabefarbraum
$\tau(\lambda)$	spektraler Transmissionsgrad
U	Spannung in Volt (V)
U_{Signal}	Spannung des CCD-Ausgangssignals
$V(\lambda)$	spektraler Hellempfindlichkeitsgrad
W	Index zur Kennzeichnung des Wiedergabefarbraums
ΔW_{Si}	Bandabstand von Silizium
x, y	Normspektralwertanteile (chromatische Koordinaten für Farbtafel)
$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$	Normspektralwertfunktionen [DIN92]
ξ	Additive Rauschkomponente
Y	Normfarbwert Y (Hellempfindung des menschlichen Sehsystems)

Abkürzungen

ADC	Analog Digital Converter
AFE	Analog Front-End
AOI	Area of Interest
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
Bit	Binary Digit
CAM	Color Appearance Model
CAT	Chromatic Adaptation Transform
CCD	Charge Coupled Device
CDS	Correlated Double Sampling
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage

CIELAB	LAB-Farbraum (CIE Standard)
CIEXYZ	XYZ-Farbraum (CIE Standard)
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CQF	Color Quality Factor
CRT	Cathode Ray Tube
CS	Channel-Stop
DIN	Deutsches Institut für Normung
DR	Dynamic Range
DSNU	Dark Signal Non-Uniformity
(E)UV	(Extreme) Ultra Violet
FPGA	Field Programmable Gate Array
FW	Full-Well (Capacity)
FWHM	Full Width at Half Maximum
GW	Gray World
HAD	Hole-Accumulation-Diode
HSB	Hue, Saturation, Brightness
HVS	Human Visual System
IC	Integrated Circuit
ICC	International Color Consortium
IF	Integraler Fehler
INL	Integrale Nichtlinearität
IT	Interline-Transfer (CCD)
ITU	International Telecommunication Union
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
LM	Lagrange-Multiplikator
LMS	Long, Middle, Short (Zapfenempfindlichkeiten des HVS)
LP	Lineare Programmierung (Linear Programming)
LOP	Lineares Optimierungsproblem
LSB	Least Significant Bit
LSQ	Least Square (Regression)
LUT	Look-Up Table
LWL	Lichtwellenleiter
MCC	Macbeth ColorChecker
MPR	Mehrdimensionale Polynomiale Regression
MTF	Modulation Transfer Function
NB	Nebenbedingungen
(N)IR	(Near) Infra Red
NL	Non-Linearity

OOI	Ocean Optics, Inc.
PAL	Phase Alternating Line
PRNU	Photo Response Non-Uniformity
PS	Progressive-Scan
PTM	Photon Transfer Method
QOP	Quadratisches Optimierungsproblem
RGB	Rot, Grün, Blau (Red, Green, Blue)
ROG	Read-Out Gate
SH	Sample & Hold
Si	Silizium
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SVD	Singular Value Decomposition
TFT	Thin Film Transistor
VGA	Variable Gain Amplifier
VIS	Visible (spectrum)
WP	White Patch
WPP	White Point Preserving

1 Einführung

1.1 Motivation

Die Aufnahme, Verarbeitung und Wiedergabe farbiger Bilder erlangt in vielen Gebieten der Industrie, Medizin und Forschung eine stetig wachsende Bedeutung. Auf Grund der rasanten Entwicklung der Halbleitertechnologie stehen inzwischen höchst leistungsfähige Hardwareplattformen zur Verfügung, die die Ausführung komplexer mathematischer Algorithmen bei hohen Datenraten direkt in einer kompakten Kamera ermöglichen. In gleicher Weise ist die serienmäßige Herstellung von siliziumbasierten Bildsensoren auf einem hohen Niveau angelangt. Diese Entwicklungsprozesse haben dazu geführt, dass mittlerweile der Konsumermarkt in der Fotografie von Digitalkameras beherrscht wird und die Nassfilmtechnik dem Aussterben nahe gekommen ist. Dadurch hat diese Entwicklung gleichzeitig eine hohe Dynamik erhalten. Parallel dazu werden ständig neue Einsatzgebiete für diese Technologie erschlossen und es ergeben sich zunehmend höhere Anforderungen in der Detailauflösung, der Bilddatenrate, des Signal-Rausch-Verhältnisses und des Farbeindrucks. Dabei ist festzustellen, dass die einzelnen Anforderungen in Abhängigkeit der Anwendung eine sehr unterschiedliche Gewichtung erhalten.

Um den hohen Anforderungen an eine Farbkamera in speziellen Einsatzbereichen gerecht werden zu können, ist eine Maßschneidung sowohl hinsichtlich der Mechanik und Elektronik als auch ihrer Bilddatenverarbeitung notwendig. So ist es beispielsweise in der Dermatoskopie eine Herausforderung, bei innerhalb bestimmter Toleranzen konstanter Beleuchtung eine hohe Farbtreue in der Bildwiedergabe zu erreichen. Gleichzeitig ist eine Reproduzierbarkeit für lange Zeiträume und zwischen einzelnen Kameras erforderlich, um sowohl den Medizinern als auch softwarebasierten Auswertungsmethoden stets eine sichere Diagnose zu ermöglichen. Eine ähnliche Kameraelektronik kann aber auch beispielsweise in der Verkehrstechnik oder in der Luftfahrt zum Einsatz kommen. In diesen Anwendungen ist einerseits auch eine hohe Farbtreue in der Farbbildreproduktion erwünscht, aber auf Grund der wechselnden Lichtbedingungen sind andere Optimierungsstrategien bezüglich der Farbdatenverarbeitung erforderlich und die Güte der Farbproduktion ist eventuell stärker mit anderen Kriterien wie dem Signal-Rausch-Verhältnis abzuwägen.

Die indirekte Messung der spektralen Empfindlichkeit eines Bildaufnahmesystems erfolgt durch Auswertung der Systemreaktion auf einen Satz von spektral breitbandigen Farbproben. Die Vorteile der indirekten Methode liegen in der Charakterisierung des gesamten Bildaufnahmesystems, im einfacheren Messaufbau und in der breitbandigen Anregung des Systems, so wie es auch in den in der Betrachtung befindlichen Anwendungsszenarien der Fall sein wird. Die Methode erfordert allerdings die Entwicklung eines mathematischen Ansatzes zur Bestimmung der Empfindlichkeitsfunktionen als Rückschluss aus den Reaktionen auf einen Satz Farbproben. In den bisherigen Arbeiten (z. B. [Kön01], [BF02], [PHI⁺04]) zur indirekten Methode wurden in erster Linie unterschiedliche mathematische Ansätze vorgestellt und getestet. Eine Schwachstelle der bislang entwickelten Methoden ist das Fehlen geeigneter Algorithmen zur gezielten Auswahl eines optimalen Farbprobensatzes begrenzter Größe, um eine praxistaugliche Umsetzung zu ermöglichen. Des Weiteren führen einige der bereits veröffentlichten mathematischen Verfahren zu inakzeptabel großen Abweichungen im Messergebnis, da diese Ansätze unter Verwendung von Konsumerkameras getestet wurden, über deren interne Verarbeitung nur begrenzte Informationen vorlagen und dadurch nur grobe Schätzungen möglich waren.

In dieser Arbeit wird eine indirekte Messmethode für die spektrale Empfindlichkeit von Bildaufnahmesystemen entwickelt und umgesetzt, die sich durch eine hohe Genauigkeit der Messergebnisse auszeichnet, um als Ausgangspunkt für eine modellbasierte Optimierung von Kameraparametern für anspruchsvolle Anwendungen dienen zu können. Die Messmethode profitiert von einem vom Autor entwickelten Verfahren zur Selektion eines geeigneten Farbprobensatzes. Der begrenzte Satz von Farbproben ermöglichte schließlich die Umsetzung eines kompakten praxistauglichen Messaufbaus zur schnellen Charakterisierung von Farbkameras mit hoher Güte. Die Ergebnisse der entwickelten Methode werden schließlich denen einer direkten Messmethode gegenübergestellt.

Der zweite Themenkern dieser Arbeit umfasst die allgemeine Zielstellung der modellbasierten Optimierung der Farbkorrekturmechanismen einer Kamera unter Nutzung der gewonnenen Spektraldaten des Bildaufnahmesystems. Dabei können spezielle Strahlungsquellen und sowohl transmittierende als auch reflektierende Objekte mit begrenztem Aufwand durch vorhandene Messverfahren und -geräte mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden. Des Weiteren erlaubt der modellbasierte Ansatz auch den Einsatz von standardisierten oder öffentlich zur Verfügung gestellten Spektraldatensätzen (z. B. [WS82], [BS93], [Sch00], [BMFC02], [Uni06]) als Ergänzung für eine gezielte Optimierung. Dazu werden verschiedene Verfahren zur Farbkorrektur zwischen Aufnahme und Wiedergabe (z. B. [VT98], [CWCR04]) vorgestellt und beurteilt. Der Schwerpunkt liegt schließlich auf der Erweiterung der Optimierungsstrategie unter den Aspekten einer gewichteten Optimierung von Farbtreue und Signal-Rausch-Verhältnis und der Berücksichtigung mehrerer Aufnahmebeleuchtungen, um eine höhere Qualität in der automatischen Anpassung einer Farbkamera an unterschiedliche Beleuchtungssituationen zu erreichen. Zur Optimierung des Signal-Rausch-Verhältnis wird das Ziel verfolgt, ein an der menschlichen Empfindung orientiertes Kriterium aufzustellen und eine variable Gewichtung gegenüber anderen Kriterien zu ermöglichen.

Die bislang veröffentlichten Methoden zur Anpassung der Farbkorrektur an mehrere Aufnahmebeleuchtungen weisen den wesentlichen Nachteil auf, dass die Anpassung im Aufnahme- oder in einem definierten Wiedergabefarbraum durchgeführt wird. Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Farbräume nicht für eine chromatische Adaption geeignet sind (s. z. B. [SHF01]). In [FJ03b] wurde ein Verfahren vorgestellt, welches durch Kombination mehrerer Transformationsmatrizen eine Farbkorrekturanpassung für mehrere Beleuchtungen realisiert. Es besitzt allerdings den Nachteil, dass die Gewichtungsfaktoren für die verschiedenen Matrizen nicht direkt aus einem Farbbild entnehmbar und auch nicht intuitiv von einem Benutzer einstellbar sind. Deshalb wird in dieser Arbeit ein neues Verfahren angestrebt, das auf einem speziellen, durch Optimierung ermittelten RGB-Farbraum zur Anpassung an verschiedene Beleuchtungen basiert. Abschließend werden die Resultate für die eingangs genannten Anwendungsbeispiele dargelegt.

1.3 Aufbau der Arbeit

Das nachfolgende Grundlagenkapitel thematisiert die Komponenten im Signalweg vom Licht bis zum digitalisierten Bildsignal mit den Schwerpunkten der Messung und Bewertung des Lichts und der Funktionsweise und Modellierung der untersuchten Bildsensoren. Anschließend werden die Grundlagen zur Farbbildreproduktion behandelt, die sich aus Verfahren der Gerätecharakterisierung, Mechanismen zur Farbkorrektur, zur spektralen Anpassung und deren Bewertung durch Gütekriterien zusammensetzt. Das zweite Grundlagenkapitel wird durch eine Einführung in die in dieser Arbeit verwendeten mathematischen Verfahren vervollständigt.

Das vierte Kapitel ist als erstes Hauptkapitel zu betrachten. Es behandelt die mathematischen Verfahren, die zur indirekten Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit eines Bildaufnahmesystems notwendig sind. Dazu zählen sowohl die Optimierungsmethoden zur indirekten Messung als auch Methoden zur Selektion geeigneter Farbproben und Verfahren zur Bewertung von Messergebnissen. Die simulationsbasierten Betrachtungen in Kapitel vier erhalten eine Ergänzung durch die Darlegung von praktisch gewonnenen Messergebnissen im fünften Kapitel. Dabei wird der speziell entwickelte Messplatz beschrieben, die erzielten Ergebnisse vorgestellt und schließlich ein Vergleich mit Messergebnissen basierend auf einer direkten Messmethode durchgeführt.

Das sechste Kapitel ist der modellbasierten Optimierung von Farbkorrekturmechanismen gewidmet. Im Speziellen werden neue Verfahren zur rauschstabilen Matrizierung und zur optimalen Multi-Beleuchtungs-Matrizierung dargelegt und untersucht. Die Arbeit wird mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick abgeschlossen.

2 Grundlagen der Farbbildsensorik

Die Basis einer jeden Kamera ist ihr Bildaufnahmesystem. Unter dem Begriff des Bildaufnahmesystems sind alle Komponenten zusammengefasst, die zur Wandlung eines optischen Signals, im Allgemeinen Licht, zu einem digitalen Signalwert dienen. Darunter sind neben dem Bildsensor als Herz des Gesamtsystems die optischen Elemente berücksichtigt, die sich im Signalweg vor ihm befinden, und die elektronischen Bauelemente, die sich ihm anschließen. Die Charakterisierung und Modellierung des Bildaufnahmesystems ist eine wesentliche Grundlage sowohl für die indirekte Bestimmung seiner spektralen Empfindlichkeit als Zwischenziel als auch für die modellbasierte Optimierung der Kameraparametrierung als Endziel dieser Arbeit. Deshalb widmet sich dieses Kapitel ausschließlich den Grundlagen zu Bildaufnahmesystemen und im Speziellen denen zur Farbbildsensorik.

Es gibt inzwischen eine Reihe von verschiedenen Farbbildsensoren unterschiedlicher Funktionsprinzipien und Herstellungstechnologien. Alle Bildsensoren erfassen auf Grund ihrer Bauweise eine Szene zweidimensional orts aufgelöst. Die Farbbildsensoren stellen eine spezielle Untergruppe dar. Der Begriff Farbe, auf den im Laufe des Kapitels noch detaillierter eingegangen wird, erhält seine Bedeutung nur im Zusammenhang mit dem menschlichen Sehsystem als Folge einer Strahlungsbewertung in dem für uns Menschen sichtbaren Wellenlängenbereich von etwa $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ bis $\lambda_2 = 700 \text{ nm}$ (VIS). Deshalb ist allen Farbbildsensoren die Verwendung des Halbleiterwerkstoffes Silizium gemeinsam, welcher auf Grund seiner Bandlücke für die Strahlungsdetektion im Wellenlängenbereich bis etwa 1100 nm einsetzbar ist.

Grundsätzlich lassen sich die Silizium-Bildsensoren nach ihrer Herstellungstechnologie in zwei Gruppen, die der CMOS¹- und die der CCD²-Sensoren, unterteilen. In den beiden Gruppen lassen sich weiterhin verschiedene Architekturen unterscheiden. Die in dieser Arbeit behandelten Charakterisierungsmethoden sind zwar prinzipiell auf alle Sensoren anwendbar, aber es sollen im Folgenden nur die Sensoren genauer betrachtet werden, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht und eingesetzt wurden. In diesem Kapitel erfolgt eine Betrachtung der Sensortechnologie und der benötigten Signalauswertungselektronik sowie eine Modellierung des Signalpfads vom Licht bis zu einem Digitalwert. Es werden einige Kamerakennwerte erfasst, die später für ein Simulationsmodell notwendig sein werden. Schließlich werden Verfahren zur spektralen Trennung betrachtet, die eine wesentliche Grundlage zur Realisierung eines technischen Sehsystems, einer Farbkamera, darstellen.

¹CMOS - Complementary Metal Oxide Semiconductor

²CCD - Charge Coupled Device

2.1 Entstehung und Bewertung von Licht

Zum Einstieg in diese Thematik erscheint zunächst eine Anmerkung zur Verwendung der Begriffe Strahlung und Licht notwendig. Die Begriffe sind einerseits eindeutig trennbar den Bereichen der Radiometrie und Fotometrie zugeordnet, werden aber andererseits im Bereich der sichtbaren Strahlung (VIS) oftmals synonym verwendet. Da in dieser Arbeit an verschiedenen Stellen fließende Übergänge zwischen strahlungsphysikalischen Betrachtungen des Bildaufnahmesystems und lichttechnischen und farbmetrischen Bewertungen von spektralen Strahlungsverteilungen im Sinne des menschlichen Sehsystems (HVS³) bestehen, ist eine konsequente Trennung der Begriffswelten zum Teil nur schwerlich umzusetzen. Für die angestrebte modellbasierte Optimierung der Farbkorrekturmechanismen einer Kamera ist die spektrale Charakterisierung auf Basis der Radiometrie eine notwendige Voraussetzung. Dabei ist wiederum die Kenntnis über die spektrale Strahlungsverteilung ohne absolute radiometrische Anbindung zunächst als hinreichend zu betrachten, um eine farbmetrische Bewertung durchzuführen. Auf diese Grundlagen wird nachfolgend detaillierter eingegangen.

2.1.1 Strahlungsquellen und Lichtarten

Die einleitende Anmerkung zur gemischten Verwendung von Begriffen aus der Radio- und Fotometrie erhält bereits an dieser Stelle ihre erste Ausprägung. Während der physikalische Grundbegriff der Strahlungsquelle von allgemeiner Natur ist und sich sowohl auf Röntgenquellen als auch auf Mikrowellensender beziehen kann, sind für die Farbkameratechnik nur solche interessant, die im VIS Strahlung emittieren. Diese Strahlungsquellen werden im Allgemeinen als Lichtquellen bezeichnet und oftmals auch anhand ihrer Leuchtdichte fotometrisch spezifiziert. Für diese Arbeit ist hingegen eine strahlungsphysikalische Charakterisierung dieser Lichtquellen eine notwendige Voraussetzung. Damit ist die Mischung der Begrifflichkeiten bereits eingetreten.

Die wichtigsten Eigenschaften einer Strahlungsquelle sind ihre Ausbreitungsrichtung, die Strahldichte, die Polarisation und die schon erwähnte Wellenlänge. Die Beschreibung dieser Eigenschaften wird im nachfolgenden Kapitel thematisiert. Zu den am häufigsten Verwendung findenden künstlichen Lichtquellen zählen Glühlampen, Leuchtstofflampen und in stetig steigendem Umfang Leuchtdioden (LED⁴). Die wichtigste natürliche Lichtquelle ist ohne Zweifel die Sonne.

Zur Erhöhung der Lebensdauer und der Lichtausbeute werden Glühlampen mit Wolfram-Glühwendel heute oftmals mit einem Halogengas gefüllt. Diese so genannten Wolfram-Halogen-Lampen zeichnen sich durch einen einfachen Aufbau und hohe Leuchtdichten bei gleichzeitig stabiler optischer Leistung aus. Diese Eigenschaften qualifizieren sie für den Einsatz in der optischen Messtechnik und werden auch im Verlauf dieser Arbeit Verwendung finden. Alternativen zeigen sich in der Verwendung von LEDs. Während diese Art der Leuchtmittel inzwischen in vielen Konsumanwendungen eingesetzt wird, eröffnen tieferegehende technische Untersuchungen mitt-

³HVS - Human Visual System

⁴LED - Light Emitting Diode

lerweile auch den Einsatz im Bereich der Licht- und Farbmesstechnik (s. z. B. [BKB06]).

Während Sonnenlicht eine typische Beleuchtung für viele Anwendungen der Farbkameratechnik darstellt, gestaltet sich ihr messtechnischer Einsatz zur Kalibrierung einer Farbkamera schwierig. Technische Tageslicht-Simulationen können beispielsweise auf Basis von gefiltertem Wolfram-Halogen-Licht ausgeführt werden. Auch Xenon-Lampen weisen eine hohe Ähnlichkeit zum Tageslichtspektrum auf. Sie besitzen aber Schwächen in der Stabilität ihrer optischen Leistung und sind daher meist ungeeignet für die Messtechnik.

Eine präzise Beschreibung von Tageslichtspektren ermöglichen hingegen die von der internationalen Beleuchtungskommission (CIE⁵) standardisierten Normlichtarten. Die Normlichtart D65 ist eine spektrale Beschreibung von durchschnittlichem mitteleuropäischen Tageslicht. Sie erfährt breite Verwendung beispielsweise als Weißreferenzspektrum für viele Computerbildschirme. Im Bereich der Fotografie lässt sich wiederum die Normlichtart D50 als Standard bezeichnen. Zur Beschreibung des Spektrums einer Glühlampe wurde die Normlichtart A definiert. Zum Einsatz in der optischen Messtechnik sind auch nach Normlichtart A kalibrierte Wolfram-Halogen-Strahlungsquellen erhältlich. Weitere Informationen zu den Normlichtarten und die entsprechenden Spektraldatensätze sind zum Beispiel [WS82] zu entnehmen.

Die für diese Arbeit wichtigste Eigenschaft der genannten Strahlungsquellen und Lichtarten ist ihre spektrale Strahlungsverteilung $S(\lambda)$. Sie ist der Ausgangspunkt für alle spektralen Untersuchungen von Objekten und Bildaufnehmern und auch eine entscheidende Größe für die optimale anwendungsspezifische Anpassung einer Farbkamera.

2.1.2 Radiometrie und Fotometrie

Nach physikalischer Betrachtung werden für die Farbwahrnehmung drei spektrale Strahlungsverteilungskurven benötigt: die der Strahlungsquelle $S(\lambda)$, die spektrale Remission eines bestrahlten Objekts $\beta(\lambda)$ und die spektrale Empfindlichkeit des Empfängers $s(\lambda)$ [BS93]. Das Produkt

$$S(\lambda) \cdot \beta(\lambda) = \varphi_\lambda(\lambda) \quad (2.1)$$

wird als spektrale Reizfunktion, Farbreizfunktion oder kurz als Farbreiz bezeichnet [DIN79]. Um die von der Quelle ausgehende, vom Objekt remittierte und schließlich vom Empfänger absorbierte Strahlung bemessen zu können, werden verschiedene strahlungsphysikalische Größen verwendet. Diese ermöglichen eine zunächst vom Empfänger unabhängige Beschreibung des optischen Systems. Üblicherweise ergeben die Messungen eine spektrale Strahlungsverteilung $X_{e,\lambda}$. Nach Beziehung

$$X_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{e,\lambda}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.2)$$

⁵CIE - Commission Internationale de l'Éclairage

ergibt sich durch Integration der spektralen Verteilungsfunktion über das Wellenlängenintervall $[\lambda_1, \lambda_2]$ die entsprechende auf das optische System wirkende Strahlungsgröße. In Tabelle 2.1 ist eine Auswahl der für diese Arbeit wichtigsten strahlungsphysikalischen Größen und in Tabelle 2.2 die entsprechenden spektralen Verteilungsfunktionen aufgeführt.

Größe	Beziehung	SI-Einheit	Erklärung
Strahlungsenergie	$Q_e = \int Q_{e,\lambda} \cdot d\lambda$	W · s	$Q_{e,\lambda} = \frac{dQ_e}{d\lambda}$ ist die spektrale Dichte der Strahlungsenergie Q_e
Strahlungsleistung (Strahlungsfluß)	$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}$	W	Die Strahlungsleistung Φ_e ist der Quotient aus Strahlungsenergie Q_e und Zeit t (auch als Strahlungsfluß bezeichnet)
Strahldichte	$L_e = \frac{d^2 \Phi_e}{d\Omega_1 \cdot dA_1 \cdot \cos \varepsilon_1}$	$\frac{W}{\text{sr} \cdot \text{m}^2}$	Die durch eine Fläche A_1 durchtretende Strahlungsleistung Φ_e bezogen auf das Produkt aus dem durchstrahlten Raumwinkel Ω_1 und der Projektion von A_1
Bestrahlungsstärke	$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA_2}$	$\frac{W}{\text{m}^2}$	Die auf eine Fläche A_2 auftreffende Strahlungsleistung Φ_e bezogen auf diese Fläche

Tabelle 2.1: Strahlungsphysikalische Größen nach DIN 5031 [DIN82a]

Größe	Formelzeichen	SI-Einheit
spektrale Strahlungsenergie	$Q_{e,\lambda}$	$\frac{W \cdot s}{\text{nm}}$
spektrale Strahlungsleistung	$\Phi_{e,\lambda}$	$\frac{W}{\text{nm}}$
spektrale Strahldichte	$L_{e,\lambda}$	$\frac{W}{\text{sr} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{nm}}$
spektrale Bestrahlungsstärke	$E_{e,\lambda}$	$\frac{W}{\text{m}^2 \cdot \text{nm}}$

Tabelle 2.2: Spektrale strahlungsphysikalische Größen nach DIN 5031 [DIN82a]

Um die strahlungsphysikalischen Größen auf einen bestimmten Empfänger zu beziehen, wird zusätzlich eine für den Empfänger charakteristische Bewertungsfunktion $s(\lambda)$ benötigt. Mit Bezug auf das HVS ist dies der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ und die sich ergebenden Größen werden als fotometrische oder lichttechnische Größen bezeichnet. Nach

$$X_v = K_m \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2.3)$$

berechnet sich die zu einer radiometrischen Größe X_e korrespondierende fotometrische Größe X_v durch Integration über ein Wellenlängenintervall $[\lambda_1, \lambda_2]$ der mit dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ gewichteten spektralen strahlungsphysikalischen Größe $X_{e,\lambda}$. Der Faktor K_m dient zur Anpassung des fotometrischen Strahlungsäquivalents bei unterschiedlichen Lichtbedingungen ($K_m = 683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ für Tagessehen und $K_m = 1699 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ für Nachtsehen [DIN82b]).

2.1.3 Farbmessstechnik

Das Ziel der Farbmessstechnik besteht in der objektiven Bemaßung von Farbvalenzen ohne Berücksichtigung der menschlichen Sinnesverarbeitung. Die Gerätetechnik zur Farbmessung ist inzwischen zu einem umfangreichen Marktsegment geworden. Die Produktpalette reicht von integrierten Dreibereichsfotoempfängern (entsprechend [DIN76]) über eindimensional ortsauflösende Spektralmessgeräte bis zu zweidimensional ortsauflösenden Mehrbereichsmesssystemen (z. B. [FJG⁺03], [Spe03], [KS02], [Krü04]).

Die Grundlage für die Farbmessstechnik wurde bereits 1931 von der internationalen Beleuchtungskommission (CIE) gelegt. Mittels Gleichheitsverfahren unter Verwendung von drei reellen Primärvalenzen \mathcal{R} , \mathcal{G} und \mathcal{B} (monochromatische Strahlungsquellen mit den Mittenwellenlängen $\lambda_R = 700,1 \text{ nm}$, $\lambda_G = 546,1 \text{ nm}$, $\lambda_B = 435,8 \text{ nm}$) gelang die näherungsweise reproduzierbare Bestimmung der Spektralwertfunktionen $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$ und $\bar{b}(\lambda)$. Dazu mussten ausgewählte, als normalsichtig eingestufte Beobachter mittels eines geeigneten Apparats eine additive Mischung der drei Primärvalenzen vornehmen, um die gleiche Farbempfindung wie bei einem vorgegebenen Farbreiz zu erzielen. Unter der Berücksichtigung physikalischer Grundlagen erfolgte anschließend die Ermittlung einer linearen Transformationsvorschrift mit dem Ziel, die in den gewonnenen Spektralwertfunktionen auftretenden negativen Anteile zu entfernen. Die daraus resultierenden Normspektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Sie werden den entsprechenden virtuellen Primärvalenzen \mathcal{X} , \mathcal{Y} und \mathcal{Z} , den so genannten Normvalenzen, zugeordnet (s. [Ric76]). Eine zusätzliche Eigenschaft der Transformation besteht darin, dass die Normspektralwertfunktion $\bar{y}(\lambda)$ dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ entspricht. Da in dem erwähnten Messapparat ein Gesichtsfeld von 2° berücksichtigt wurde, spricht man auch von der Definition des hypothetischen 2° Normalbeobachters nach CIE 1931. Detailliertere Ausführungen sind beispielsweise [Ric76] oder [WS82] zu entnehmen.

Die Bewertung eines Farbreizes $\varphi_\lambda(\lambda)$ nach dem Dreibereichsverfahren (s. [DIN76]) führt mit

$$X = \int \bar{x}(\lambda) \cdot \varphi_\lambda(\lambda) \cdot d(\lambda) \quad Y = \int \bar{y}(\lambda) \cdot \varphi_\lambda(\lambda) \cdot d(\lambda) \quad Z = \int \bar{z}(\lambda) \cdot \varphi_\lambda(\lambda) \cdot d(\lambda) \quad (2.4)$$

zu einem Dreifarbenwert (*tristimulus value*) bestehend aus den Normfarbwerten X , Y und Z . Jedes Normfarbwerttripel lässt sich durch geeignete mathematische Beziehungen in ein anderes Farbmaßsystem transformieren. Um beispielsweise die Farbart einer Farbvalenz anschaulich gra-

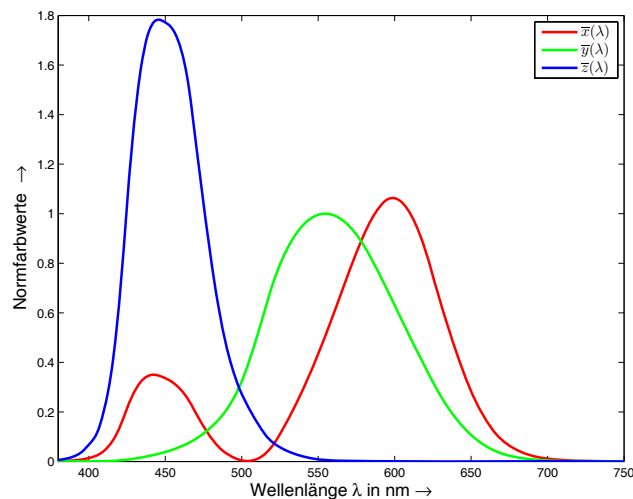


Abbildung 2.1: Die Normspektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ nach CIE 1931

fisch darzustellen, lassen sich durch Normierung die Normfarbwertanteile x und y nach

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2.5)$$

berechnen. Da $x + y + z = 1$ gilt, ist jede Farbart durch die zwei Komponenten xy und jede Farbvalenz auch durch einen Dreifarbenwert xyZ eindeutig beschreibbar.

Die Farbart jeder Farbvalenz lässt sich durch einen Farbort in der xy -Farbtafel kennzeichnen. Da es sich bei den Beziehungen (2.5) um lineare Transformationen handelt, bleiben die Gesetze der additiven Farbmischung erhalten. Dadurch können Mischfarben beispielsweise durch eine Schwerpunktbestimmung ermittelt werden (s. [Ric76]). Ausgehend vom Normvalenzsystem sind verschiedenste weitere mathematische Transformationen denkbar, die immer eine Verbesserung hinsichtlich einer bestimmten Interpretation, Bewertung oder Verarbeitung der Farbwerte zum Ziel haben. Die allgemeinste und flexibelste Herangehensweise besteht in einer Messung des Farbreizes nach dem Spektralverfahren und einer anschließenden valenzmetrischen Auswertung. Dieser Ansatz ist auch die Grundlage der vorliegenden Arbeit.

Die Ansätze und Methoden der farbmetrischen Bewertung von spektralen Farbreizfunktionen bedürfen keiner besonderen Kenntnisse über das menschliche Sehsystem, denn die farbmetrische Bestimmung eines Farbreizes geschieht unabhängig von jeglichen Umgebungseinflüssen (s. z. B. [Ric76], [WS82]). Das HVS reagiert hingegen unterschiedlich auf einen bestimmten Farbreiz in Abhängigkeit verschiedener Einflüsse, zum Beispiel der Helligkeit, der Umgebungsbeleuchtung oder der Hintergrundfarbe. Diese subjektive Interpretation wird als Farbpfindung oder Farbwahrnehmung bezeichnet. Deren Beschreibung ist Aufgabe so genannter Farberscheinungsmodelle (CAM⁶, s. z. B. [Fai05]).

Eine der wichtigsten Grundlagen ist die Opponenten-Theorie, die sich auf da Vinci und Hering

⁶CAM - Color Appearance Model

zurückführen lässt. Da Vinci erwähnte erstmalig die Aufteilung in zwei unbunte und vier bunte Primärfarben. Hering als Wahrnehmungspsychologe bezeichnete später die vier elementaren Farbempfindungen rot, gelb, grün und blau als psychologische Primärfarben, die durch einen schwarz / weiß-opponenten Prozess ergänzt werden. Biologisch wird es durch erregende und hemmende Vorgänge im menschlichen Nervensystem erklärt, die Signale durch entsprechende Verknüpfung der Zapfenreaktionen zum Gehirn senden [SF02]. Eine relativ einfache mathematische Abbildung stellt die Transformation vom Normvalenzsystem in den CIELAB-Farbraum dar. Die Transformation trägt der Farbempfindung in der Form Rechnung, dass sie in erster Näherung für eine empfindungsgemäße Gleichabständigkeit der Farborte sorgt und dass die Farbachsen a und b entsprechend der Opponenten-Theorie von rot nach grün bzw. von gelb nach blau gerichtet sind. Die nichtlineare Berechnungsvorschrift nach

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_{ref}}} - 16 \\ a^* &= 500 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{X}{X_{ref}}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_{ref}}} \right) \\ b^* &= 200 \cdot \left(\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_{ref}}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_{ref}}} \right) \end{aligned} \quad \text{mit} \quad \begin{bmatrix} X_{ref} \\ Y_{ref} \\ Z_{ref} \end{bmatrix} \quad \text{– Normfarbwert der Weißreferenz} \quad (2.6)$$

wurde 1976 von der CIE definiert und als Norm verabschiedet. Die Transformation besitzt allerdings den Nachteil, dass die Gesetze der additiven Farbmischung verloren gehen. Der CIELAB-Farbraum stellt eine wichtige Grundlage für die Bewertung von Farbabständen (z. B. Abweichungen in der Farbproduktion) dar und dient als Basis für die Gütebewertung in der anwendungsspezifischen Kameraparametrierung (s. auch Kap. 3.4.3).

2.2 Bildsensoren und Signalwandlung

Die praktischen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden unter Verwendung von Kameras mit Progressive-Scan Interline-Transfer CCD-Sensoren (PS IT CCD) durchgeführt. Während diese Sensoren für eine Signalwandlung von den auftreffenden Photonen zu einer elektrischen Spannung sorgen ist ein weiteres Bauelement zur Umsetzung des analogen elektrischen Signals in einen digitalen Signalwert erforderlich. Dieses Bauelement wird als CCD-Signalprozessor oder auch als AFE⁷ bezeichnet. Für die gesamte Einheit zur zweidimensional orts aufgelösten Strahlungserfassung und Bereitstellung dieser Daten in digitaler Form soll im Folgenden der Begriff Bildaufnahmesystem verwendet werden.

In diesem Unterkapitel wird der Aufbau, die Funktionsweise und die Modellierung von Bildaufnahmesystemen bestehend aus den genannten PS IT CCD-Sensoren und AFEs detailliert behandelt. Viele Prinzipien und Methoden sind direkt auf andere Architekturen, zum Beispiel Full-

⁷A FE - Analog Front-End

Frame oder Frame-Transfer CCDs, oder auch auf die Familie der CMOS-Sensoren übertragbar.

2.2.1 Progressive-Scan Interline-Transfer CCD

Es gibt verschiedene Architekturen von CCD-Sensoren, die sich entsprechend ihres Aufbaus und Auslesemechanismus in die Typen Full-Frame, Frame-Transfer, Interline-Transfer und die Mischform Frame-Interline-Transfer einteilen lassen (s. z. B. [Hol98], [The95]). Außerdem ist die spezielle Kategorie der Zeilensensoren (*Linear Arrays*) zu nennen, die zwar nach obiger Definition nicht in die Gruppe der Bildsensoren einzuordnen sind, aber über eine ähnliche Funktionsweise verfügen und auch oft in einer scannenden Arbeitsweise zur hochauflösenden Bilderfassung eingesetzt werden. Die in Abbildung 2.2 dargestellte Struktur eines Interline-Transfer CCD-Sensors besitzt den Vorteil des Bildauslesens über die lichtgeschützten vertikalen Schieberegister (V-CCD) bei gleichzeitiger Belichtung eines neuen Bildes in den aktiven Pixeln, ohne die benötigte Chipfläche gegenüber einem Full-Frame CCD zu erhöhen. Um dennoch eine möglichst große effektive lichtempfindliche Fläche (Füllfaktor) eines IT Sensors realisieren zu können, werden meist Mikrolinsen eingesetzt (s. Kap. 2.2.2).

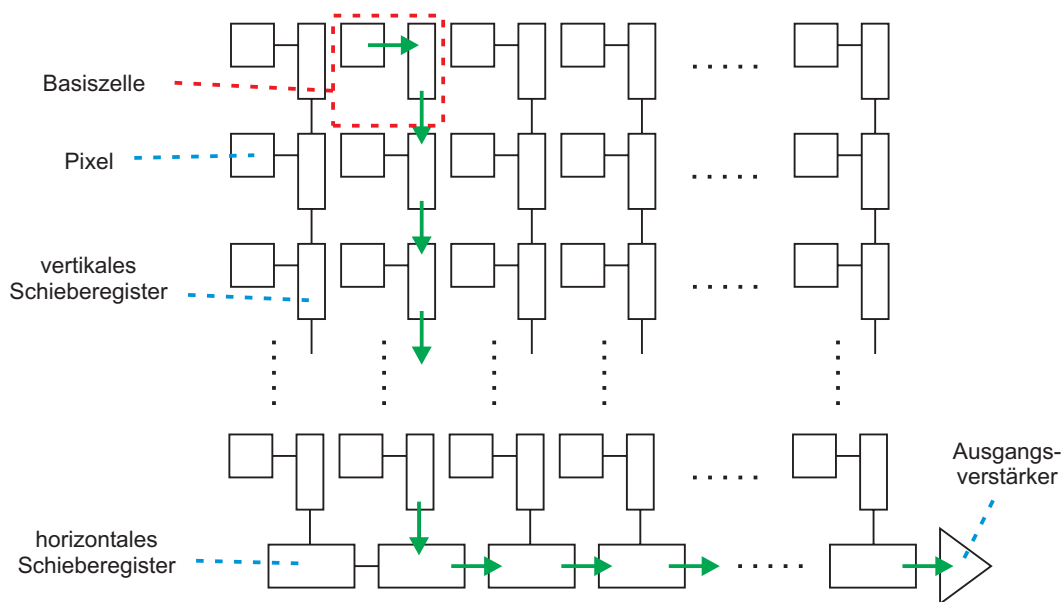


Abbildung 2.2: Architektur eines Progressive-Scan Interline-Transfer CCDs

CCD-Sensoren besitzen an den Rändern der lichtempfindlichen Fläche einige Bereiche mit abgedunkelten Pixeln, die bei der Verarbeitung des analogen Sensorausgangssignals zur dynamischen Anbindung an einen Dunkelreferenzsignalwert dienen (s. Kap. 2.2.3). Alle Pixel, sowohl lichtempfindliche als auch Dunkelreferenzpixel, sind über ein Transfer Gate (oder auch „Read-Out Gate“, ROG) an die Vertikalregister gekoppelt (vgl. Abb. 2.3). Das Gatter sorgt für einen gleichzeitigen Transfer aller in den Fotodioden (s. Kap. 2.2.2) generierten Ladungen in den geschützten

Bereich der Vertikalregister und definiert damit das Ende einer Belichtungsperiode. Die vertikalen Schieberegister werden meist drei- oder vierphasig betrieben und ermöglichen den Ladungstransport in das horizontale Schieberegister (H-CCD), auch Ausleseregister genannt. Am Ende des horizontalen Schieberegisters befindet sich ein Ladungsverstärker (*Sense Node Amplifier*), der die Ladungen in eine elektrische Spannung umwandelt. Der Sensor wird Zeile für Zeile und Pixel für Pixel ausgelesen. Dieses Verfahren wird mit dem Begriff Progressive-Scan (PS) bezeichnet. Im Gegensatz dazu stehen halbbildorientierte Arbeitsweisen, bei denen abwechselnd alle gerad- oder ungeradzahlgigen Zeilen ausgelesen werden. Diese Arbeitsweise wird bei Bildsensoren für die Fernsehvideotechnik verwendet (s. z. B. [Poy96], [O⁺96]).

Die Sensor-Architektur erlaubt auch besondere von der beschriebenen PS-Variante abweichende Ausleseverfahren. Zum Beispiel werden bei dem unter dem Begriff Binning bekannten Modus immer mehrere Zeilen nacheinander in das Horizontalregister transferiert bevor dieses ausgelesen wird. Dieser Modus besitzt die Vorteile der Erhöhung der Sensorempfindlichkeit und des schnelleren Auslesens, welches zu einer höheren Bildrate führt. Diesen entgegen steht der Nachteil einer geringeren örtlichen Auflösung. Das Prinzip des Zusammenschiebens von Bildzeilen kann auch genutzt werden, um nur einen bestimmten Bildbereich (AOI⁸) vollständig auszulesen und die restliche Information möglichst schnell aus dem Sensor zu schieben.

Desweiteren gibt es spezielle Varianten dieser Architektur mit mehreren Ausleseregistern, beispielsweise durch Trennung des Horizontalregisters in zwei Hälften mit jeweils einem Ladungsverstärker an beiden Enden. Dadurch kann die Pixeldatenrate in erster Näherung verdoppelt beziehungsweise bei weiteren Auslesekanälen vervielfacht werden. Details sind zum Beispiel in [Hol98] beschrieben.

2.2.2 Fotodiode

Der Prozess der Strahlungsdetektion eines CCDs wird durch Absorption eines Photons und die dadurch hervorgerufene Generation eines Elektron-Loch-Paars im Silizium beschrieben. Jedes Pixel eines CCDs kann als Ladungsspeicher aufgefasst werden. Es gibt derer zwei Arten, das Fotogate und die Fotodiode. Bei dem betrachteten Sensortyp stellt die Hole-Accumulation-Diode (HAD), eine gepinnte Fotodiode, den gegenwärtigen Stand der Technik dar. Sie kombiniert die guten Eigenschaften des Fotogate mit seiner hohen Ladungskapazität und der Fotodiode mit ihrer höheren Empfindlichkeit bei kürzeren Wellenlängen im VIS [Hol98].

Die Abbildung 2.3 zeigt das technologische Prinzip einer Hole-Accumulation-Diode, welche bei Sony in der Mitte der achtziger Jahre entwickelt wurde. Diese Technologie wurde im Lauf der Zeit durch spezielle Zusatzstrukturen erweitert. Daraus entstanden in den neunziger Jahren Technologien wie Super HAD und ExView HAD, die auch heute noch zu den modernsten CCD-Architekturen zählen. In Abbildung 2.3 ist der Aufbau der grundlegenden HAD schematisch dargestellt.

Die spektrale Sensorempfindlichkeit, deren Bestimmung einen Kernpunkt dieser Arbeit darstellt,

⁸AOI - Area of Interest

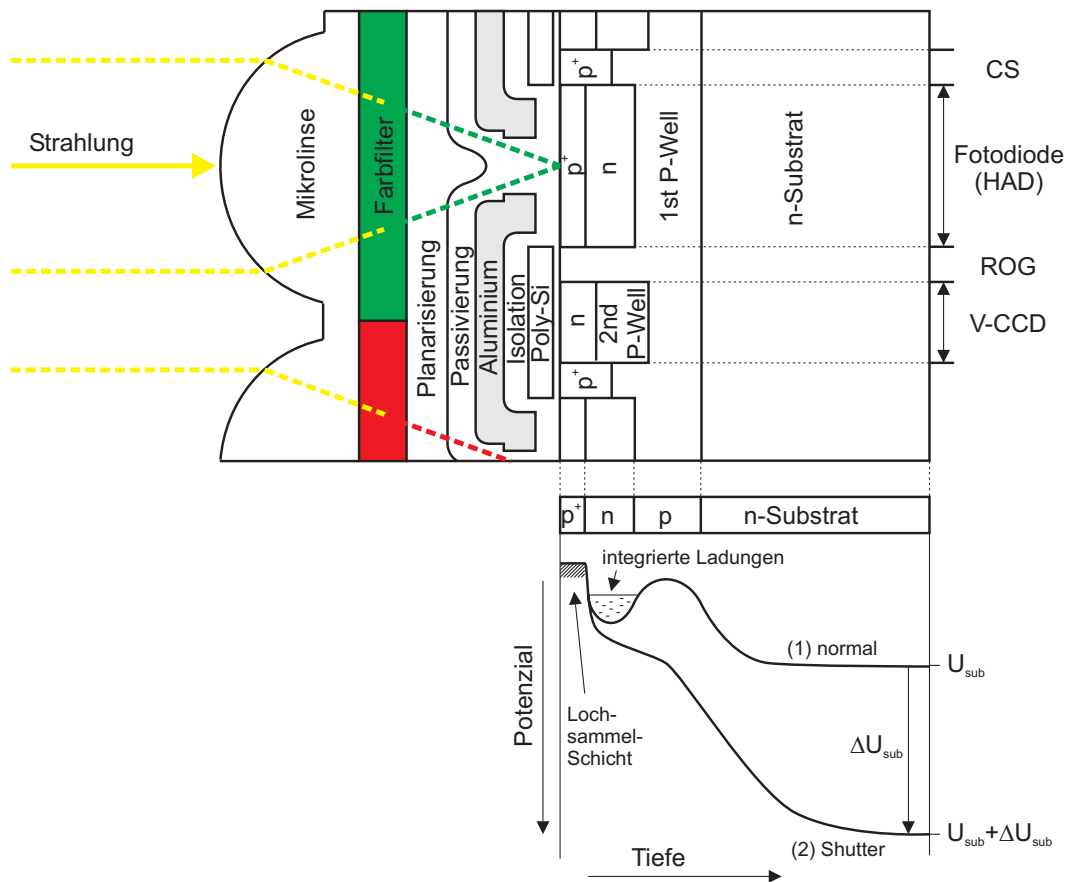


Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau einer Hole-Accumulation-Diode und der Potenzialverlauf im Silizium (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an [O⁺96])

hängt vom Halbleitersubstrat und vom Aufbau der Fotodiode ab. Um den Bandabstand ΔW_{Si} von Silizium zu überwinden, muss die Energie des Photons E_{ph} höher als $\Delta W_{Si} \approx 1,12 \text{ eV}$ sein. Daraus folgt eine theoretische obere Grenze des Wellenlängenbereichs bei

$$\lambda_{max,Si} = \frac{h \cdot c}{\Delta W_{Si}} \approx 1107 \text{ nm} \quad (2.7)$$

mit $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}$ und $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. Die untere Grenze des detektierbaren Wellenlängenbereichs hängt sehr stark von der Architektur des Bildsensors ab. Je kürzer die Wellenlänge der auftreffenden Photonen ist, desto höher ist deren Energie und desto geringer ist deren Eindringtiefe in den Halbleiter (s. z. B. [Jan01]). Da kurzwellige Strahlung ($\lambda \approx 400 \text{ nm}$) bereits oberflächennah absorbiert wird, ist die Dicke der Isolationsschicht (s. Abb. 2.3) maßgeblich für die untere Grenze des detektierbaren Wellenlängenbereichs verantwortlich. Diese so genannten vorderseitig belichteten CCD (*frontside illuminated*) besitzen typischerweise einen spektralen Empfindlichkeitsbereich von etwa 300 nm bis 1000 nm. Im Gegensatz dazu

können die rückseitig belichteten (*backside illuminated*) Sensoren auch bis in den EUV⁹-Bereich ($\lambda \approx 13 \text{ nm}$) eingesetzt werden. Die Abhängigkeit der Photonen-Eindringtiefe in das Silizium kann aber auch genutzt werden, um in der Tiefe des Halbleiters spektral selektiv zu detektieren (s. Kap. 2.4). Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass neben der Erzeugung von Ladungsträgern durch den foto-elektrischen Effekt auch eine thermische Erzeugung stattfindet. Die Differenzierung zwischen thermisch und durch Strahlung erzeugtem Signal erfolgt auf Basis der im vorhergehenden Unterkapitel erwähnten Dunkelreferenzpixel am Randbereich jeder CCD-Matrix (s. auch Kap. 2.2.3). In den Dunkelreferenzpixeln findet im Idealfall eine ausschließlich thermische Ladungsträgererzeugung statt und diese geschieht im Mittel in gleicher Anzahl wie in den lichtempfindlichen Pixeln. Damit ergibt sich das durch Strahlung hervorgerufene Signal als Differenz zur Dunkelreferenz.

Eine weitere Eigenschaft von CCD-Sensoren ist die Möglichkeit eines elektronischen Verschlusses (*Shutter*) zur Einstellung der Integrationszeit (entspricht der Einstellung einer Belichtungszeit durch einen mechanischen Verschluss). Im unteren Teil der Abbildung 2.3 ist der Potenzialverlauf im fotoaktiven Bereich in der Tiefe des Halbleiters dargestellt. Es lässt sich zum Einen erkennen, dass die Ladungskapazität der Fotodiode (s. auch Kap. 2.3.2) von der Substratspannung U_{sub} abhängt und zum Anderen, dass eine starke Erhöhung der Substratspannung mit ΔU_{sub} zu einem Abfluss der bis dahin integrierten Ladungsträger an das Substrat führt. Dieses Prinzip des Rücksetzens aller Pixel wird als elektronischer Verschluss oder Shutter bezeichnet. Die Integrationszeit des CCD ergibt sich damit vom Ende des Shutterpulses bis zum Ende des Bildtransferpulses. Neben des Einflusses der Substratspannung auf die Ladungskapazität der Pixel kann diese sich ebenso auf die spektrale Empfindlichkeit des Sensors auswirken.

2.2.3 CCD-Signalprozessor

Ein CCD-Signalprozessor, auch als AFE bezeichnet, dient der Abtastung des zeit- und wertkontinuierlichen CCD-Ausgangssignals und der Umsetzung in diskrete Werte. Aus der zeitlichen Diskretisierung ergibt sich wiederum eine örtlich diskrete Darstellung der Bildinformation wie sie der Bildsensor erfasst. Die erforderliche Schaltungstechnik ist heutzutage als integrierter Schaltkreis (IC¹⁰) verfügbar, kann aber auch diskret aufgebaut werden. Abbildung 2.4 zeigt die wesentlichen Komponenten eines solchen ICs.

Die funktionalen Basis-Komponenten eines AFEs sind eine CDS¹¹-Schaltung, ein einstellbarer Verstärker (VGA¹²), ein Analog-Digital-Umsetzer (ADC¹³) und eine Rückkopplungsschaltung zur Schwarzwertklemmung. Die CDS-Schaltung sorgt für eine doppelte Abtastung des Sensorausgangssignals, um die Differenz zwischen dem Rücksetzpotenzial des CCD-Ausgangs und dem jeweiligen Signalpotenzial jedes Pixels zu bestimmen. Die doppelte Abtastung ist notwendig, da

⁹EUV - Extreme Ultra Violet

¹⁰IC - Integrated Circuit

¹¹CDS - Correlated Double Sampling

¹²VGA - Variable Gain Amplifier

¹³ADC - Analog Digital Converter

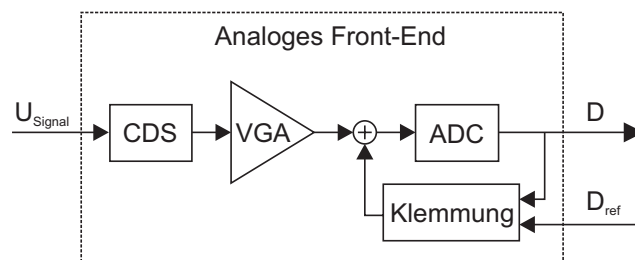


Abbildung 2.4: Struktur eines CCD-Signalprozessors

der Sensorausgangsverstärker für jedes Pixel zurückgesetzt werden muss und danach jeweils ein in Grenzen zufälliges Resetpotenzial einnimmt. Unter der Annahme, dass der nach jedem Zurücksetzen sich einstellende Pixelsignalwert im Bezug zu dem jeweiligen Resetpotenzial steht, werden zwei parallele Abtast-Halte-Glieder (SH¹⁴) verwendet, um zu den entsprechenden Zeitpunkten das Resetpotenzial und das anschließende Signalpotenzial abzutasten und festzuhalten. Die Potenzialdifferenz entspricht dem jeweiligen Pixelsignalwert und kann als wertkontinuierliches aber zeitdiskretes Signal weiterverarbeitet werden. An dieser Stelle ist anzumerken, dass in solchen Schaltkreisen auch oftmals analoge Filter eingesetzt werden, um Frequenzanteile, die über der Nyquistfrequenz liegen, zu dämpfen, aber die Frequenzanteile bis zur Nyquistfrequenz vollständig zu übertragen (s. [Hol98]).

Der VGA dient der einstellbaren Verstärkung des wertkontinuierlichen Differenzsignals. Seine wesentliche Aufgabe besteht darin, den Umsetzungsbereich des nachfolgenden ADC optimal auszusteuern. Dies sorgt für ein geringes Quantisierungsrauschen (vgl. Kap. 2.2.5) und vermeidet fehlende Signalwerte (*Missing Codes*) wie sie bei einer digitalen Verstärkung bei gleicher Signalaufösung entstehen würden. Die zweite wichtige Voraussetzung zur optimalen Aussteuerung des ADC und zur Einstellung eines definierten Nullsignalwertes wird durch die so genannte Schwarzwertklemmung erreicht. Wie in den beiden vorhergehenden Unterkapiteln erwähnt, verfügen CCD-Sensoren über strahlungsgeschützte Dunkelreferenzpixel. In diesen Pixeln werden in erster Linie durch thermische Prozesse Ladungsträger generiert, deren korrespondierender Signalwert als Dunkelreferenzsignal definiert wird. Der Klemmschaltung werden diese Pixel signalisiert, so dass sie durch die Rückkopplung einen ausgleichenden Signaloffset erzeugen kann. Der einzustellende Dunkelreferenzwert D_{ref} als Zielgröße dieser Regelschleife wird in der Regel deutlich größer Null gewählt, um die Rauschverteilung des Dunkelsignals vollständig in die digitale Verarbeitung zu überführen (s. Kap. 2.2.5).

¹⁴SH - Sample & Hold

2.2.4 Modell des Signalpfads

Dieses Kapitel beschreibt ein Modell für den Signalpfad, das aus den in den vorhergehenden Unterkapiteln aufgeführten Komponenten besteht. Die Modellierung erfolgt in Anlehnung an die Ausführungen von Holst in [Hol98].

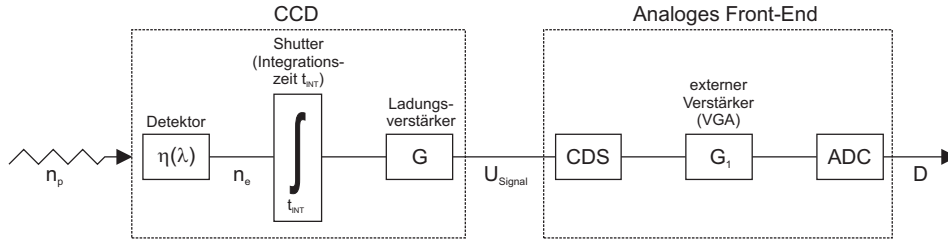


Abbildung 2.5: Modell des Signalpfads (Signal-Transfer-Modell) (Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an [Hol98])

Das Signal-Transfer-Modell in Abbildung 2.5 beschreibt den gesamten Signalweg von der elektromagnetischen Strahlung (Licht) in Form von einer Anzahl n_p Photonen bis zu einem Digitalwert D . Die Wandlung der Photonen (Lichtquanten) in elektrische Ladungsträger wird mit dem wellenlängenabhängigen Quantenwirkungsgrad $\eta(\lambda)$ durch

$$n_e = \int_{\lambda} \eta(\lambda) \cdot n_p(\lambda) d\lambda \quad (2.8)$$

beschrieben. Während in der Halbleitertechnik üblicherweise der Quantenwirkungsgrad $\eta(\lambda)$ Anwendung findet, ist für eine Sensorcharakterisierung mit Bezug zur Farbmessstechnik die spektrale Empfindlichkeit $s(\lambda)$ als ausreichend anzusehen, da hier oftmals kein Bezug zu absoluten Größen hergestellt wird. Dies trifft auch auf die Untersuchungen in dieser Arbeit zu. Deshalb werden hier nicht absolute spektrale strahlungsphysikalische Größen wie $E_e(\lambda)$ verwendet, sondern relative spektrale Strahlungsverteilungsfunktionen $S(\lambda)$. $S(\lambda)$ kann auch als relative spektrale Bestrahlungsstärkeverteilung $E_{e,rel}(\lambda)$ aufgefasst werden.

Es ist aber von grundlegender Bedeutung, die Signalwandlung eingehend zu betrachten, da die Parametrierung von Bildsensor und CCD-Signalprozessor wesentliche Auswirkungen auf die Signalqualität und damit auf die Güte der Ergebnisse der vorgestellten Charakterisierungsmethoden und schließlich auf alle weiteren anwendungsspezifischen Optimierungen in der Farbsignalverarbeitung besitzt.

Der Ladungsverstärker am CCD-Ausgang wandelt die Ladungsträger n_e nach

$$U_{Signal} = \frac{G \cdot n_e \cdot q}{C} \quad \text{mit} \quad \left[\frac{G \cdot q}{C} \right] = \frac{\mu V}{e^-} \quad (2.9)$$

in eine elektrische Spannung U_{Signal} . Das Wandlungsverhältnis von n_e Ladungsträgern zu U_{Signal}

ergibt sich aus dem Verstärkungsfaktor G , der Elementarladung q und der Kapazität C des Ladungsverstärkers. Während das Signal im Sensor wertdiskret ($n_e \cdot q$) und auch zeitlich (bzw. örtlich) diskret vorliegt, erzeugt der Ausgangsverstärker daraus ein zeit- und wertkontinuierliches Spannungssignal, welches nachfolgend durch das AFE zu digitalen Werten D verarbeitet wird. Damit lässt sich die gesamte Signalwandlung durch

$$D = D_{ref} + K_{sys} \cdot \int_{\lambda} \eta(\lambda) \cdot n_p(\lambda) d\lambda \quad \text{mit} \quad K_{sys} = \frac{2^d}{U_{max}} \cdot G_1 \cdot \frac{G \cdot q}{C} \quad (2.10)$$

beschreiben. Der zusätzliche Verstärkungsfaktor G_1 entsteht durch den VGA des AFE. In die Berechnung des Systemübertragungsfaktors K_{sys} fließt schließlich noch die Auflösung des ADC mit seiner Bitbreite d und der maximalen Eingangsspannung U_{max} ein.

Während Beziehung (2.10) unter Voraussetzung der Kenntnis aller genannten Größen eine Anbindung der digitalen Werte D an absolute Strahlungsgrößen ermöglicht, lässt sich der Zusammenhang zwischen relativen spektralen Strahlungsverteilungen und der Reaktion r des Bildaufnahmesystems in Analogie zu Beziehung (2.4) durch

$$r = \int_{\lambda} s(\lambda) \cdot \varphi_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad \text{mit} \quad \varphi_{\lambda}(\lambda) = S(\lambda) \cdot \beta(\lambda) \quad (2.11)$$

beschreiben. Der Zusammenhang der Beziehungen (2.10) und (2.11) ist durch

$$r = \int_{\lambda} s(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \beta(\lambda) d\lambda = K \cdot (D - D_{ref}) \quad (2.12)$$

gegeben. Dabei dient der Faktor K zur Entkopplung zwischen den wertebereichsunabhängigen Reaktionen r und den auf Basis von absoluten Strahlungsgrößen und physikalischen Parametern des Bildaufnahmesystems berechenbaren Digitalwerten. Mit Fokussierung auf die für diese Arbeit wesentlichen Aspekte zur spektralen Kameracharakterisierung und anwendungsspezifischen Parametrierung der Farbsignalverarbeitung ist die Beschreibung nach Beziehung (2.11) ohne absolute Anbindung an strahlungsphysikalische Größen als ausreichend zu betrachten.

Schließlich werden in der mathematischen Systembetrachtung noch die wellenlängenkontinuierlichen Funktionen durch wellenlängendiskrete Spektralwerte ersetzt. Damit lässt sich das diskrete lineare Kameramodell (Signal-Transfer-Modell) unter Anwendung der linearen Algebra durch

$$r = \mathbf{s}^T \cdot \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\beta} \quad (2.13)$$

beschreiben. Dabei enthält \mathbf{s} die spektrale Empfindlichkeitsfunktion $s(\lambda)$ des Bildaufnahmesystems, die Diagonalmatrix \mathbf{S} das Strahlungsspektrum $S(\lambda)$ und der Vektor $\boldsymbol{\beta}$ das Objektspektrum $\beta(\lambda)$. Die wellenlängendiskrete Darstellung ist eine notwendige Voraussetzung für die in dieser Arbeit behandelten numerischen Verfahren und stellt auch keine wesentliche Einschränkung für die verwendeten breitbandigen Spektralfunktionen dar, da sie in der Praxis auch nur wellenlängendiskret messbar sind.

2.2.5 Modell zum Rauschen

Zur Modellierung einer realen Kamera ist neben der Beschreibung der Signalwandlung auch eine Beschreibung der Störgrößen notwendig. Störgrößen sind demnach alle Prozesse, die zu einer Abweichung vom linearen Kameramodell in Beziehung (2.13) führen. Obwohl der Begriff Rauschen (*Noise*) zunächst Signalstörungen basierend auf Zufallsprozessen impliziert, werden in der Bildsensorik auch zeitlich konstante ortsabhängige Störungen wie die Hellsignalungleichförmigkeit unter dem allgemeinen Oberbegriff Rauschen eingeordnet. Dementsprechend lassen sich die Störgrößen nach orts- und zeitabhängigen Quellen unterteilen. Alle ortsabhängigen Quellen können als deterministisch betrachtet und prinzipiell korrigiert werden. Eine Korrektur ist für viele messtechnische Untersuchungen notwendig, zum Beispiel bei der Erfassung einiger Kamerakennwerte wie im anschließenden Unterkapitel beschrieben. Das nachfolgend beschriebene Modell zum Rauschen (s. Abb. 2.6) basiert auf Ausführungen von [Hol98] und [Häf01] und ist auch die Grundlage für entsprechende Messverfahren in [EMV05]. Das Modell beinhaltet alle wesentlichen zu berücksichtigenden Störquellen.

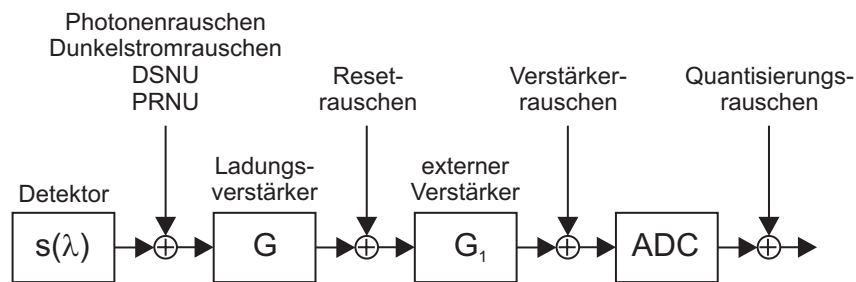


Abbildung 2.6: Modell zur Störgrößeneinkopplung (Rausch-Transfer-Strukturmodell)
(Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an [Hol98] und [Häf01])

Die Prozesse des Photon- und des Dunkelstromrauschens basieren auf der diskreten Natur der Elektronen und können statistisch durch Poissonverteilungen beschrieben werden. Entsprechend der Statistik poissonverteilter Zufallsgrößen gilt für die Standardabweichung σ_p des Photonrauschprozesses nach

$$\sigma_p = \sqrt{\mu_e (\cdot e^-)} \quad \text{mit} \quad [\mu_e] = [\sigma_p] = e^- \quad (2.14)$$

die zahlenmäßige Gleichheit von Varianz σ_p^2 und mittlerem Signalwert μ_e als Erwartungswert der Verteilung. Zur Anpassung der physikalischen Dimensionen ist in Beziehung (2.14) ein Elektron e^- als Korrekturfaktor eingefügt.

Die Dunkelsignalungleichförmigkeit (DSNU¹⁵) kann bei modernen CCD-Sensoren in guter Näherung vernachlässigt werden. Im Gegensatz dazu ist die Standardabweichung σ_{PRNU} der Hellsignalungleichförmigkeit (PRNU¹⁶), welche sich proportional zum mittleren Signalwert μ_e verhält,

¹⁵DSNU - Dark Signal Non-Uniformity

¹⁶PRNU - Photo Response Non-Uniformity

eine im Modell zu berücksichtigende Rauschkenngroße (s. Kap. 2.3.2).

In Kapitel 2.2.3 wurde bereits erwähnt, dass der Sensorausgangsverstärker für jedes Pixel zurückgesetzt werden muss und danach jeweils ein in Grenzen zufälliges Resetpotenzial annimmt. Dieses Verhalten wird als Resetrauschen bezeichnet. Die in dem Zusammenhang vorgestellte CDS-Schaltung sorgt hingegen für eine Minimierung des Resetrauschens, so dass dieses im Rauschmodell nicht berücksichtigt werden muss.

Das signalunabhängige Grundrauschen eines Bildaufnahmesystems wird durch das Dunkelstromrauschen und das Verstärkerrauschen bestimmt. Es wird hier als Dunkelsignalrauschen σ_{dark} zusammengefasst, da dessen messtechnische Bestimmung auf Basis des Dunkelsignals durchzuführen ist (s. Kap. 2.3.1).

Schließlich entsteht durch den ADC ein Quantisierungsrauschen mit

$$\sigma_{ADC} = \frac{\Delta U}{\sqrt{12}} = \frac{U_{max}}{2^d \cdot \sqrt{12}} \quad (2.15)$$

unter der Annahme einer Gleichwahrscheinlichkeit aller Quantisierungsfehler in jedem Quantisierungsintervall ΔU . Das Intervall ΔU ergibt sich aus der Anzahl 2^d der Quantisierungsstufen im Umsetzungsbereich U_{max} (s. auch [BB97]). Die Vernachlässigung des Quantisierungsrauschens ist zulässig, wenn der ADC über eine ausreichende Bitbreite d verfügt.

Das Gesamtrauschen σ_{sys} des Bildaufnahmesystems ergibt sich nach

$$\sigma_{sys} = \sqrt{\sigma_{dark}^2 + \sigma_p^2 + \sigma_{PRNU}^2} \quad (2.16)$$

durch geometrische Addition der Rauschteile, die vorhergehend als relevant eingestuft wurden. Das Rauschen des Bildaufnahmesystems führt zu einer Unsicherheit $\xi(r)$ in seiner Reaktion r . Die Unsicherheit $\xi(r)$ ist eine Zufallsgröße deren stochastische Verteilung mit σ_{sys} bemaßt werden kann. Sie hängt folglich von einigen Kamerakennwerten und von der Höhe des Eingangssignals ab. Unter Berücksichtigung des Rauschens wird das Kameramodell aus Beziehung (2.13) zu

$$r = \mathbf{s}^T \cdot \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\beta} + \xi(r) \quad (2.17)$$

durch die Rauschkomponente $\xi(r)$ erweitert. Zur realistischen Simulation der Unsicherheit in der Reaktion r werden nachfolgend die wichtigsten Kamerakennwerte zu den untersuchten Kameras ermittelt.

2.3 Bestimmung ausgewählter Kamerakennwerte

In diesem Abschnitt werden einige wesentliche Kamerakennwerte betrachtet, die später zur Modellierung der Kamera in der Simulation eingesetzt werden. Zur Definition, Erläuterung und Bestimmung der Kennwerte können beispielsweise [Jan01], [Hol98], [EMV05] und [Krü04] herangezogen werden. Alle Betrachtungen erfolgen auf Basis der digitalisierten Sensorrohdaten D , die auch als Grauwerte bezeichnet und in der Einheit LSB¹⁷ angegeben werden. Entsprechend erfolgt auch die Angabe der statistischen Kennwerte, beispielsweise der Standardabweichung σ_y , in LSB. Diese grauwertbezogenen Angaben werden durch den Index y gekennzeichnet. Die hier verwendeten Bildaufnahmesysteme liefern Digitalwerte mit einer typischen Auflösung von 12 Bit, so dass sich die Angaben auf einen Wertebereich von ${}^{12}G = \{0, \dots, 4095\}$ beziehen.

2.3.1 Dunkelsignal und Dynamik

Das durch ein AFE rekonstruierte digitale Dunkelsignal eines Bildsensors erhält einen stabilen Mittelwert durch Bezugnahme des Signalpegels auf die abgedunkelten Bildbereiche. Bei hochwertigen CCD-Kameras wird die Dunkelsignalungleichförmigkeit (DSNU) auf ein vernachlässigbares Minimum reduziert, so dass es in den nachfolgenden Betrachtungen nicht separat behandelt werden muss. Die am Grundrauschen des Bildaufnahmesystems beteiligten Störprozesse werden hier zu einem Dunkelsignalrauschen zusammengefasst. Das Dunkelsignalrauschen wird nach

$$\sigma_{y,dark} = \sqrt{\frac{1}{P-1} \sum_{i=1}^P (D_i - \mu_{y,dark})^2} \quad (2.18)$$

durch die Standardabweichung $\sigma_{y,dark}$ vom mittleren Dunkelsignalwert $\mu_{y,dark}$ oder der entsprechenden Varianz $\sigma_{y,dark}^2$ spezifiziert. Die Bestimmung erfolgt in einem Bildausschnitt (AOI) über eine Anzahl von P Pixeln. Die untersuchten Kameras besitzen eine Standardabweichung im Dunkelsignal von $\sigma_{y,dark} \approx 4$ LSB, woraus sich auch die Kenngröße der Dynamik bestimmen lässt.

Der Dynamikbereich DR (*Dynamic Range*) eines Bildaufnahmesystems beschreibt nach

$$DR = \frac{D_{max}}{D_{min}} = \frac{D_{max}}{\sigma_{y,dark}} \hat{=} 20 \cdot \log \left(\frac{D_{max}}{\sigma_{y,dark}} \right) \text{ dB} \quad (2.19)$$

das Verhältnis zwischen dem maximalen Signalwert und einem minimal nutzbaren, welcher als äquivalent zur Standardabweichung des Dunkelsignals definiert wird. Die Angabe erfolgt in der Regel in deziBel (dB) (vgl. auch [XDCW02]). Daraus ergibt sich nach

$$DR = \frac{2^{12} \text{ LSB}}{4 \text{ LSB}} \hat{=} \sim 60 \text{ dB} \quad (2.20)$$

ein Dynamikbereich von etwa 60 dB für die untersuchten Kameras.

¹⁷LSB - Least Significant Bit

2.3.2 Hellsignal und Fullwell-Kapazität

Ein Standardverfahren zur Charakterisierung des Hellsignalverhaltens einer Kamera ist die so genannte Photonen-Transfer-Methode (PTM, s. z. B. [Jan01]). Bei dieser Methode wird bei unterschiedlichen Aussteuerungen des Bildsensors die jeweilige Standardabweichung oder Varianz im Hellsignal ins Verhältnis zu ihrem mittleren Signalwert gesetzt. Aus den Messungen ergibt sich die Photonen-Transfer-Kurve, von der sich weitere Kenngrößen ableiten lassen. Bei diesem Verfahren werden nur die zeitlichen Rauschgrößen berücksichtigt. Die örtlichen Störgrößen (DSNU, PRNU) werden durch Differenzbildung von zwei Bildern (A, B) eliminiert. Damit kann zur Bestimmung der zeitlichen Varianz

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{P} \cdot \sum_{i=1}^P (D_{A,i} - D_{B,i})^2 \quad (2.21)$$

des Signals eine Auswertung von P örtlich verteilten Pixeln angesetzt werden. In der praktischen Methodik lässt sich durch Variation der Integrationszeit bei konstanter Beleuchtung eine schnelle und präzise Messung durchführen. Eine Photonen-Transfer-Kurve als Ergebnis einer solchen Messreihe ist in Abbildung 2.7 dargestellt.

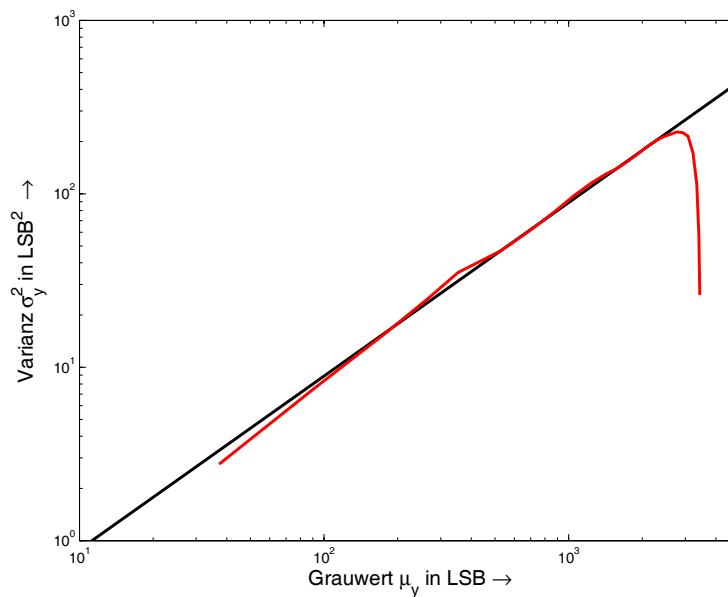


Abbildung 2.7: Photonen-Transfer-Kurve und Regressionsgerade (eigene Messergebnisse)

Eine Auswertung der Kurve ist nur dann sinnvoll, wenn sie einen linearen Zusammenhang zwischen Varianz und Mittelwert zeigt. Dann ergibt sich der Systemübertragungsfaktor (vgl. Bez. (2.10)) nach

$$K_{sys} = \frac{\sigma_y^2 - \sigma_{y,dark}^2}{(\mu_y - \mu_{y,dark}) \cdot (e^-)} \quad \text{mit} \quad [K_{sys}] = \frac{LSB}{e^-} \quad (2.22)$$

als Steigung des linearen Abschnitts zwischen Dunkelsignalschwelle und Sättigungspunkt. Die-

ser Ansatz zur Ermittlung von K_{sys} basiert auf dem statistischen Zusammenhang in Beziehung (2.14). Deshalb ist auch hier ein Elektron e^- als Korrekturfaktor eingefügt, um für K_{sys} die richtige physikalische Dimension zu erhalten. Für die untersuchten Kameras wurde der Systemübertragungsfaktor $K_{sys} \approx 0,09 \text{ LSB} / e^-$ ermittelt. Der Kehrwert von K_{sys} ist mit etwa $11 e^- / \text{LSB}$ anhand der Regressionsgerade in Abbildung 2.7 ablesbar (Schnittpunkt der Regressionsgerade mit der Abszisse bei $\sigma_y^2 = 1$).

Basierend auf der Photonen-Transfer-Kurve lässt sich neben dem Systemübertragungsfaktor K_{sys} auch die maximale Anzahl $n_{e,FW}$ der in einem Pixel des Sensors generierbaren Ladungsträger, bezeichnet als Full-Well-Kapazität (*FW Capacity*), bestimmen. Dieser Wert ist bei dem in Abbildung 2.7 zu erkennenden Sättigungspunkt erreicht. Die untersuchte Kamera erreicht am Sättigungspunkt einen maximalen Grauwert von $D_{max} \approx 3000 \text{ LSB}$. Daraus ergibt sich eine Full-Well-Kapazität von

$$n_{e,FW} = \frac{D_{max}}{K_{sys}} \approx 33 \cdot 10^3 e^- \quad (2.23)$$

für die Pixel dieses Bildsensors. Mithilfe dieser Parameter können die stochastischen Prozesse bei der Bildaufnahme in einer Simulation praxisnah modelliert werden.

2.3.3 Nichtlinearität

Auf Grund der integrierenden Arbeitsweise von CCD-Sensoren wird der Zusammenhang zwischen Bestrahlungsstärke und Kamerareaktion in erster Näherung als linear angenommen. Genaue messtechnische Untersuchungen zeigen aber in der Regel eine geringfügige Nichtlinearität NL in der Übertragungskennlinie auf. Diese Nichtlinearität kann verschiedene Ursachen haben, die oftmals mit der Parametrierung der Bildsensoransteuerung zusammenhängen. Sie kann aber auch durch eine Nichtlinearität der Kapazität des Ladungsverstärkers oder in der analogen Signalverarbeitung oder durch die unterschiedlichen Versorgungsspannungen hervorgerufen werden (s. [PCO05], [EMV06]). Sie ist damit eine individuelle Eigenschaft jedes komplexen Bildaufnahme-systems (s. a. [Sch99]).

Ein Maß für die Abweichung von der Linearität ist nach [PCO05] gegeben durch

$$NL = \frac{|+\Delta D_{max}| + |-\Delta D_{max}|}{D_{max}} \cdot 100\% \quad (2.24)$$

mit der maximalen positiven ($+\Delta D_{max}$) und der maximalen negativen ($-\Delta D_{max}$) Abweichung von der Regressionsgeraden bezogen auf den maximalen Signalwert D_{max} . Dieses Maß stellt eine sehr kritische Bewertungsmethode dar, da die Summe der Abweichungen in beiden Richtungen betrachtet wird. Typischerweise wird in der Messtechnik entsprechend der so genannten Toleranzbandmethode nur die maximale Abweichung in einer Richtung von der Regressionsgeraden als Linearitätsfehler angegeben. Alternative Bewertungsmöglichkeiten stellen die mittlere quadratische Abweichung (z. B. [SK99]) oder das Bestimmtheitsmaß R^2 aus der Regressionsanalyse dar (z. B. [Qua02]).

Es gibt zwei prinzipielle Messverfahren zur Bestimmung der Übertragungskennlinie. Zum Einen kann die Messung durch Variation der Bestrahlungsstärke bei konstanter Integrationszeit (z. B. [VFTB97a], [Bar99]) durchgeführt werden und zum Anderen durch Variation der Integrationszeit bei konstanter Bestrahlung (s. [Krü04]). Beim ersten Verfahren gestaltet sich die Einstellung der Bestrahlungsstärke schwierig und muss stets separat gemessen werden. Damit ist der Fehler dieser Referenzmessung bestimmend für die Genauigkeit der zu ermittelnden Übertragungskennlinie [SK99]. Unter der Voraussetzung einer präzise einstellbaren Integrationszeit ist das zweite Verfahren grundsätzlich dem ersten vorzuziehen, da es einfacher zu realisieren ist und genauere Messungen ermöglicht. Diese Voraussetzung ist für die hier untersuchten PS IT CCDs gegeben und wird deshalb auch angewendet. Unter Verwendung dieser Messmethode ergibt sich nach Beziehung (2.24) eine Nichtlinearität von unter 2% für die untersuchten Kameras (s. a. Kap. 5.1). Da diese Methode nur für Bildaufnahmesysteme anwendbar ist, die eine feine und präzise Einstellung verschiedener Belichtungszeiten ermöglichen, stellt der in [EMV06] vorgeschlagene Ansatz mittels gepulster LED-Strahlungsquellen eine Alternative als allgemeine Messmethode dar. Zur Erweiterung des Kameramodells in Beziehung (2.17) wird die Übertragungskennlinie als eine Funktion \mathcal{F} des Eingangssignals eingeführt. Danach ergibt sich die Reaktion des Bildaufnahmesystems zu

$$r = \mathcal{F}(\mathbf{s}^T \cdot \mathbf{S} \cdot \boldsymbol{\beta} + \xi(r)) \quad (2.25)$$

mit der Übertragungskennlinie \mathcal{F} . Zur Korrektur der Nichtlinearität wird später die Umkehrfunktion \mathcal{F}^{-1} zur Übertragungskennlinie benötigt.

2.4 Verfahren zur spektralen Trennung

Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Parametrierung technischer Farbsehensysteme, die für die Farbbildaufnahme und Aufbereitung zur Wiedergabe eingesetzt werden sollen. In der Farbbildaufnahme lässt sich zwischen vier verschiedenen Verfahren unterscheiden. Als klassische Verfahren sind die optische, die zeitliche und die örtliche Signaltrennung zu nennen (z. B. [Krü04]). Vor wenigen Jahren wurde die Farbbildsensorik durch die Umsetzung eines Verfahrens erweitert, das die wellenlängenabhängige Eindringtiefe der elektromagnetischen Strahlung in den Halbleiter zur spektralen Diskretisierung ausnutzt. Das Sensorprinzip wurde durch die Firma Foveon entwickelt und ist in [Mer99] geschützt. Diese neuartige Sensortechnik hat sich allerdings bislang nur in wenigen Bereichen durchsetzen können.

In dieser Arbeit werden Einchip-Farbbildsensoren untersucht, die auf dem Prinzip der örtlichen Signaltrennung basieren. Diese Sensoren erlauben eine kompakte Bauweise der Kamera, geringere Kosten gegenüber einer optischen Signaltrennung mit dichroitischen Strahlteilerprismen und eine hohe Bildwiederholrate im Vergleich zu Lösungen mit zeitlicher Signaltrennung. Dabei findet die Erfassung der Farbkomponenten zwar gleichzeitig aber nur näherungsweise am gleichen Ort statt. Das Prinzip ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Es ist das typische Verfahren bei Einchip-Farbbild-

sensoren, wie den hier betrachteten PS IT CCD-Sensoren.

Die meisten dieser Farbbildsensoren verfügen über eine Mosaikstruktur mit RGB-Primärfarbfilerung in der Bayer-Anordnung ([Bay76], s. Abb. 2.8). Die spektrale Trennung wird durch organische Filter realisiert (s. z. B. [WS82], [O⁺96]). In Abbildung 2.9 ist die relative spektrale Empfindlichkeit des Sensors KAI-1020CM von Kodak dargestellt. Die zum Vergleich dargestellten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen LMS¹⁸ des menschlichen Sehsystems (HVS) zeigen, dass zwischen dem menschlichen und dem technischen Sehvermögen signifikante Unterschiede bestehen. Eine technische Realisierung spektraler Empfindlichkeiten entsprechend dem HVS hätte prinzipbedingte Nachteile auf Grund der starken Überlappung der L- und der M-Funktion zur Folge. Zum Einen können kleine Toleranzen wie beim Menschen zur Farbfehlsichtigkeit führen und zum Anderen entsteht ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis auf Grund der dann notwendigen Kanaldifferenzbildung bei der Verarbeitung der Sensorreaktionen [HHFD97].

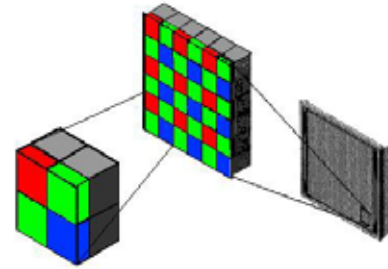


Abb. 2.8: Örtliche Signaltrennung mit RGB-Bayer-Filter

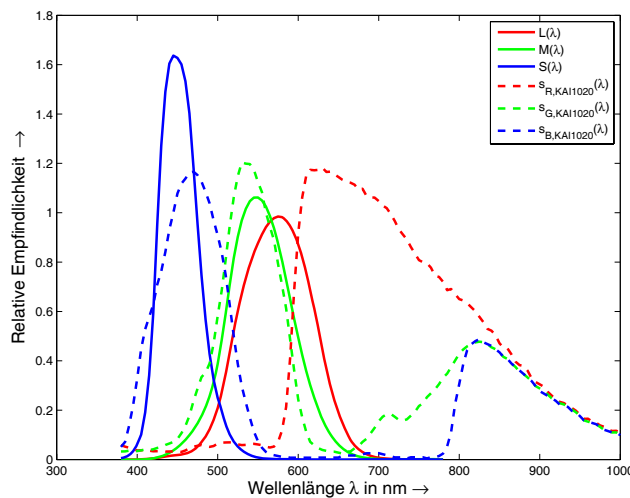


Abbildung 2.9: Die relative spektrale Empfindlichkeit des Sensors Kodak KAI-1020CM [Eas07] und die des HVS (normiert für M , $s_{G,KAI1020}$ bei $\lambda = 560$ nm)

Analog zu Beziehung (2.11) liefern die Sensorelemente des Farbkanals k mit ihrer spektralen Empfindlichkeit $s_k(\lambda)$ nach

$$r_k = \int_{\lambda} s_k(\lambda) \cdot \varphi_{\lambda}(\lambda) d(\lambda) \quad (2.26)$$

eine Sensorreaktion r_k auf einen spektralen Farbreiz $\varphi_{\lambda}(\lambda)$. Durch jedes der eingangs genannten Verfahren ergeben sich mehrere Aufnahmekanäle mit unterschiedlicher spektraler Empfindlich-

¹⁸LMS - Long, Middle, Short (auf Wellenlängebereiche bezogen)

keit. Bei der optischen, zeitlichen und örtlichen Signaltrennung resultiert die spektrale Empfindlichkeit jedes Farbkanals aus der Empfindlichkeitsfunktion eines vergleichbaren Monochromsensors und den spektralen Filterfunktionen \mathbf{f}_C ($N \times K$ -Matrix) der eingesetzten oder auf den Sensor aufgetragenen Farbfilter. Die spektrale Empfindlichkeit \mathbf{s}_C eines Farbbildaufnahmesystems lässt sich numerisch nach

$$\mathbf{s}_C = \text{diag}(\mathbf{s}) \cdot \mathbf{f}_C \quad (2.27)$$

aus der spektralen Empfindlichkeit \mathbf{s} des monochromen Bildaufnahmesystems und der Farbfiltermatrix \mathbf{f}_C berechnen.

Die $N \times K$ -Matrix \mathbf{s}_C repräsentiert die wellenlängendiskret dargestellte spektrale Empfindlichkeit aller Kanäle K eines entsprechenden Farbbildsensors. Dabei fertigen die jeweiligen Hersteller ihre Bildsensoren mit örtlicher Signaltrennung in der Regel spektral unangepasst. Diese Matrizen \mathbf{s}_C sind immer im Wellenlängenbereich bis etwa 1100 nm zu betrachten, da die aufgetragenen organischen Filter eine Durchlässigkeit im nahen Infrarot (NIR¹⁹) besitzen, so dass im Gegensatz zum HVS eine Detektion von Strahlung im NIR-Bereich möglich ist (vgl. Abb. 2.9). Die spektrale Anpassung von \mathbf{s}_C an das HVS wird im nächsten Kapitel betrachtet.

2.5 Modell der Bildaufnahme

Zusammenfassend erfolgt die Modellbildung (vgl. auch [Bar99]) nach

$$\mathbf{r} = \mathcal{F}(\mathbf{t}) = \mathcal{F}(\mathbf{s}_C^T \cdot \mathbf{C} + \xi(r)) \quad \text{mit} \quad \mathbf{C} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{B} \quad (2.28)$$

mit den Rohdaten \mathbf{r} und der nichtlinearen Übertragungskennlinie \mathcal{F} des Bildaufnahmesystems. Die linear korrigierten Daten \mathbf{t} ergeben sich gleichermaßen aus dem Produkt der spektralen Empfindlichkeit des Bildaufnahmesystems \mathbf{s}_C und der Farbprobenmatrix \mathbf{C} . Die Farbprobenmatrix \mathbf{C} setzt sich wiederum aus der Diagonalmatrix \mathbf{S} , welche das Beleuchtungsspektrum enthält, und der $N \times O$ -Matrix \mathbf{B} zusammen, die eine Anzahl von O Objektspektren β enthält. Mit $\xi(r)$ wird eine Zufallsgröße als Rauschkomponente additiv hinzugefügt. Für die stochastische Verteilung dieser Zufallsgröße wird das Dunkelsignalrauschen mit σ_{dark} , das Photonentrauschen mit σ_p und die PRNU mit σ_{PRNU} berücksichtigt. Alle in dieser Arbeit vorgestellten mathematischen Methoden basieren auf der Annahme linearer Daten \mathbf{t} . Die Daten \mathbf{t} werden nachfolgend auch unter dem Begriff Farbwerttripel verwendet, da in dieser Arbeit ausschließlich Bildsensoren mit drei Farbkanälen Verwendung finden (es gilt $K = 3$). In den Abschnitten zur praktischen Anwendung wird jeweils gesondert auf die Behandlung der Reaktionen \mathbf{r} eines realen Bildaufnahmesystems eingegangen.

¹⁹NIR - Near Infra Red

3 Grundlagen zur Optimierung der Farbbildreproduktion

Ein System zur Farbbildreproduktion wird durch den Signalweg von einer Szene über ein Bildaufnahmesystem bis zur Bildwiedergabe beschrieben (vgl. Abb. 1.1). Dabei lässt sich eine Szene durch eine Anordnung beleuchteter Objekte beschreiben. Das Ziel besteht darin, die Szene in einer Weise wiederzugeben, in der sie hinsichtlich der menschlichen Wahrnehmung dem Originaleindruck entspricht. Die Ansatzpunkte zur Optimierung der Farbbildreproduktion liegen unter den einleitend genannten Bedingungen in der Gestaltung oder Anpassung der spektralen Charakteristik des Bildaufnahmesystems und in der Optimierung der Transformation von den Farbdaten des Bildaufnahmesystems zu denen des Wiedergabegeräts.

Zur Transformation der Farbdaten werden in dieser Arbeit grundlegende Mechanismen zur Anpassung der Farbdaten Ausgabe eines Aufnahmeegeräts an die Darstellung eines Wiedergabegeräts behandelt. Dieser Ansatz erhält die Bezeichnung Farbkorrektur (*Color Correction*) und dient einer direkten Abbildung des Aufnahme Farbraums auf den Wiedergabefarbraum. Die Farbkorrektur ist als Grundlage für ein Farbmanagementsystem aufzufassen und auf Basis der in diesem Kapitel beschriebenen Ansätze können auch ICC¹-Profile für Farbbildaufnahmeegeräte erstellt werden. Bei dieser so genannten ICC-Profilierung handelt es sich um ein vom ICC standardisiertes Verfahren, um beim Austausch von Farbbilddaten zwischen verschiedenen Farbbildaufnahme- und Wiedergabegeräten jeweils eine farbtreue Reproduktion zu erzielen (s. [ICC06]).

Im Folgenden liegt der Fokus aber weniger auf einer Geräteprofilierung nach ICC sondern mehr auf Basismechanismen zur optimalen Anpassung eines Bildaufnahmesystems an das menschliche Sehsystem (HVS). Dazu ist vor allem das Adaptionsverhalten des HVS (*Chromatische Adaption - Chromatic Adaptation*) zur Anpassung an unterschiedliche Beleuchtungen zu berücksichtigen. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 3.1 ein 4-Schichten-Modell zur Modellierung des Farbsehens. Auf der untersten Ebene findet eine spektrale und somit ausschließlich physikalische Betrachtung des Bildaufnahmesystems statt. Diese stellt das Fundament für alle weiteren Betrachtungen und Berechnungen dar und wird als Kernthema dieser Arbeit behandelt. Die spektrale Charakterisierung der einzelnen Komponenten erlaubt schließlich eine Modellierung jedes Anwendungssystems (s. a. [Bar99]), da auf der Basis des spektralen Modells die höheren Ebenen aufgebaut werden können. Die vorgestellten Farbkorrektur-Methoden verwenden trichromatische Farbdaten (Schicht 2) und es werden Ansätze zur chromatischen Anpassung berücksichtigt (Schicht 3).

¹ICC - International Color Consortium

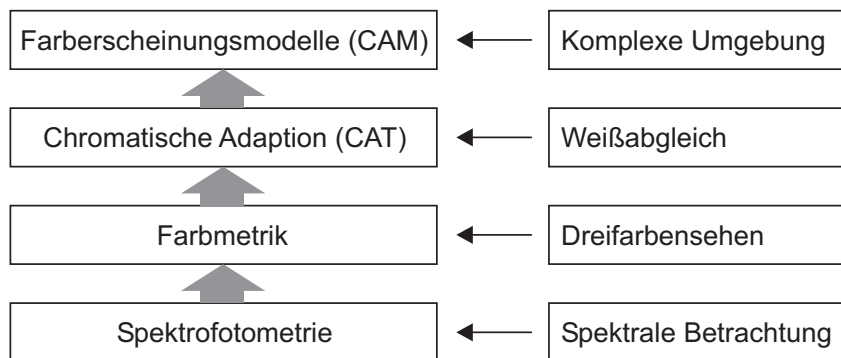


Abbildung 3.1: Modellierung des Farbsehens in Anlehnung an Cardei [Car00] und Fairchild [Fai05]

Nachfolgend wird die Definition des Aufnahme- und Wiedergabefarbraums im Detail beschrieben, um sich anschließend den angesprochenen Mechanismen zur Optimierung der Farbbildreproduktion, der Farbkorrektur und der spektralen Anpassung, zuzuwenden. Abschließend erfolgt eine Einführung in die in dieser Arbeit verwendeten Optimierungswerkzeuge, die sowohl zur indirekten spektralen Charakterisierung als auch zur Berechnung von Farbkorrektur-Transformationen dienen werden.

3.1 Farbraumsspezifische Gerätecharakterisierung

Die Farbkorrektur dient der Transformation zwischen dem Aufnahme- und dem Wiedergabefarbraum. Die Definition dieser beiden Farbräume ist Gegenstand dieses Unterkapitels. Der Aufnahme- und Wiedergabefarbraum wird für trichromatische Bildaufnahmesysteme beschrieben, da diese in erster Linie im Anwendungsfeld der am menschlichen Beobachter orientierten Farbsehensysteme Verwendung finden. Während später die Berechnung von Farbkorrektur-Transformationen auf trichromatischen Daten erfolgen wird, werden die Farbräume spektral charakterisiert. Dadurch wird ein modellbasiertes Generieren trichromatischer Daten für unterschiedliche Aufnahme- und Wiedergabebedingungen ermöglicht. Dies stellt eine wesentliche Eigenschaft des angestrebten Verfahrens zur anwendungsspezifischen Kameraparametrierung dar und verleiht diesem ein hohes Maß an Flexibilität.

3.1.1 Trichromatische Bildaufnahmesysteme

Die trichromatischen Bildaufnahmesysteme lassen sich im Wesentlichen in zwei Kategorien unterteilen, in die der Kameras auf Basis von Flächensensoren und die der Scanner auf Basis von Zeilensensoren. Diese Unterteilung hat für die Betrachtung von Farbkorrektur-Methoden nur eine untergeordnete Bedeutung. Scanner sind in der Regel als geschlossene Systeme aufgebaut und ver-

fügen über eine konstante Beleuchtung. Ihr Aufnahmefarbraum ist damit als statisch zu betrachten und stellt einen Spezialfall gegenüber vielen Kameraanwendungen dar, in denen wechselnde Beleuchtungen dynamisch veränderbare Aufnahmefarbräume erfordern.

Da die Veränderung auch abrupte Übergänge zwischen verschiedenartigen Beleuchtungen beinhaltet, soll jede einzelne Beleuchtung als quasistatischer Spezialfall betrachtet werden. Die statische Beschreibung des Aufnahmefarbraums soll in dieser Arbeit als hinreichende Bedingung zur Behandlung aller Fälle angesehen werden. Damit können sowohl Scanner als auch Kameras der gleichen Art der Betrachtung unterzogen werden.

Neben den weit verbreiteten trichromatischen Systemen existieren inzwischen auch eine Reihe von Lösungen für die multispektrale Bildaufnahme (s. z. B. [HSB00], [Hel06]). In der Anwendung dieser Aufnahmetechnik verbirgt sich die Zielstellung, eine spektrale Rekonstruktion durchzuführen. Dadurch kann die Verarbeitung der aufgenommenen Daten auf die unterste Schicht des Modells in Abbildung 3.1 aufgebaut werden. Die hier vorgestellten Farbkorrektur-Methoden werden hingegen auf der zweiten Schicht, der farbmetrischen Betrachtung basieren. In [CWL⁺05] wurde der Ansatz geprüft, den Aufnahmefarbraum einer RGB-Kamera mittels Algorithmen zur spektralen Rekonstruktion zu charakterisieren. Dieser Ansatz hat allerdings gegenüber den hier verwendeten Techniken auf Basis von Farbwerttripeln schlechtere Ergebnisse aufgezeigt und wird daher an dieser Stelle nicht weiter verfolgt.

Die Farbmessstechnik bewertet Licht in seiner spektralen Verteilung $S(\lambda)$ mit drei genormten Empfindlichkeitsfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ und kennzeichnet Farbe durch drei Normfarbwerte X , Y und Z (vgl. Kap. 2.1.3). Unter Nutzung des Dreikomponentenverfahrens wird in Analogie zu Beziehung (2.4) nach

$$\mathbf{t}_{XYZ} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{s}_{XYZ}^T \cdot \mathbf{C} \quad \text{mit} \quad \mathbf{C} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{B} \quad (3.1)$$

die Farbe von Objekten mittels Bewertung ihrer spektralen Ausstrahlungen \mathbf{C} durch genormte Farbwerttripel \mathbf{t}_{XYZ} in numerischer Form beschrieben. Die in den Farbwerttripeln enthaltenen Normfarbwerte können als Reaktion der Normspektralwertfunktionen auf einen Farbreiz aufgefasst werden. Sie sind abhängig vom Spektrum der Beleuchtung \mathbf{S} und der spektralen Reflexion der Objekte \mathbf{B} . Damit ergeben sich für jedes farblich zu spezifizierende Objekt unterschiedliche Farbwerttripel in Abhängigkeit des Beleuchtungsspektrums.

Diese Bedingung gilt gleichermaßen für die Farbwerttripel \mathbf{t} , die ein Bildaufnahmesystem als Reaktion auf die Farbprobenmatrix \mathbf{C} erzeugt. Das Bildaufnahmesystem wird hier in Form seines spezifischen Aufnahmefarbraums durch die Farbwerttripel \mathbf{t}_A für eine bestimmte Beleuchtung \mathbf{S}_A und einen Probensatz \mathbf{B} charakterisiert. Der Index A kennzeichnet dabei die Zuordnung zum Aufnahmefarbraum. Die Farbwerttripel \mathbf{t}_A können nach

$$\mathbf{t}_A = \mathbf{s}_A^T \cdot \mathbf{C}_A \quad \text{mit} \quad \mathbf{C}_A = \mathbf{S}_A \cdot \mathbf{B} \quad (3.2)$$

numerisch aus S_A und B auf Basis der spektralen Empfindlichkeit s des Bildaufnahmesystems berechnet werden.

Nach klassischer Methode werden die t_A direkt aus der Reaktion r des Bildaufnahmesystems auf S_A und B in einem Messaufbau erfasst. Für einen solchen Messaufbau sind stabile und homogene Lichtquellen sowie Testkarten, die die benötigten Objektspektren erzeugen, erforderlich. Eine solche Messanordnung sorgt für starke Einschränkungen in der Verwendung spezieller anwendungstypischer Objekte und auch in der Anpassung an unterschiedliche Beleuchtungen und bietet somit eine äußerst geringe Flexibilität für eine anwendungsspezifische Optimierung. Der gegenüber der klassischen Methode allgemeinere und flexiblere Ansatz basiert auf einer spektralen Charakterisierung des Bildaufnahmesystems, so dass anschließend verschiedenste Beleuchtungs- und Objektspektren in ein spektrales Modell aufgenommen werden können.

Die spektrale Charakterisierung setzt im Vergleich zur farbmtrischen eine Ebene tiefer im Modell nach Abbildung 3.1 an. Dabei werden die spektralen Aufnahmeeigenschaften des Empfängers bestimmt, so dass die Farbwerttripel t_A , die das Bildaufnahmesystem als Reaktion auf eine Farbprobenmatrix C_A erzeugen würde, nach Beziehung (3.2) berechnet werden können. Unter Kenntnis von s lassen sich schließlich die Reaktionen des Bildaufnahmesystems auf verschiedene Beleuchtungen S_A und beliebige geeignete Objektspektren B schnell und flexibel vorherbestimmen. In dieser Flexibilität liegt die Leistungsfähigkeit des spektralen Modells. Es erlaubt beispielsweise neben der Berücksichtigung aller messbaren realen Objektspektren auch den Einsatz von so genannten virtuellen Testtafeln (s. auch [Kön01]) zur Ermittlung einer für eine spezifische Anwendung optimalen Transformationsvorschrift. Dies ist sehr vorteilhaft für spezielle Applikationen, wie die Archivierung von Gemälden ([Oku05]) oder im Bereich der Medizin (s. z. B. [Mün06]), dessen typische Objektspektren oftmals durch Standard-Testkarten nicht ausreichend repräsentiert werden. Es kann aber auch für viele andere Anwendungen hilfreich sein, verschiedene Standard-Testkarten in einem Probensatz zu vereinen oder diesen durch bestimmte gemessene Objektspektren zu ergänzen. Nicht zuletzt ermöglicht der spektrale Modellansatz auch die Berücksichtigung verschiedener Beleuchtungsspektren, die sowohl messtechnisch erfasst oder auch beispielsweise durch Normlichtarten ersetzt werden können.

3.1.2 Selbstleuchtende Wiedergabegeräte

Mit dem Begriff selbstleuchtende Wiedergabegeräte werden beispielsweise Kathodenstrahlröhren (CRT²), LCD³-Bildschirme und verschiedene Arten von Projektoren bezeichnet. Diese Geräte arbeiten nach dem Prinzip der additiven Farbmischtheorie (s. z. B. [Ric76]). Dies unterscheidet sie wesentlich von allen druckenden Wiedergabemedien, welche auf einem so genannten subtraktiven Farbmischverfahren basieren ([Ric76]).

Hier werden nur selbstleuchtende Wiedergabegeräte mit trichromatischen Systemen betrachtet. Ihre Farbwiedergabeeigenschaften lassen sich allein durch Angabe der chromatischen Koordina-

²CRT - Cathode Ray Tube

³LCD - Liquid Crystal Display

ten (x,y) ihrer Primärvalenzen und des Weißpunktes beschreiben. Alle innerhalb des im chromatischen Diagramm durch die Primärvalenzen aufgespannten Dreiecks liegenden Farbwerte sind durch das Gerät mit Bezug zum Weißpunkt misch- und somit darstellbar. In Abbildung 3.2 sind die Standard-Wiedergabefarbräume sRGB ([IEC99], vgl. ITU-R BT.709, [Rec95]), Adobe RGB 1998 und Apple RGB dargestellt.

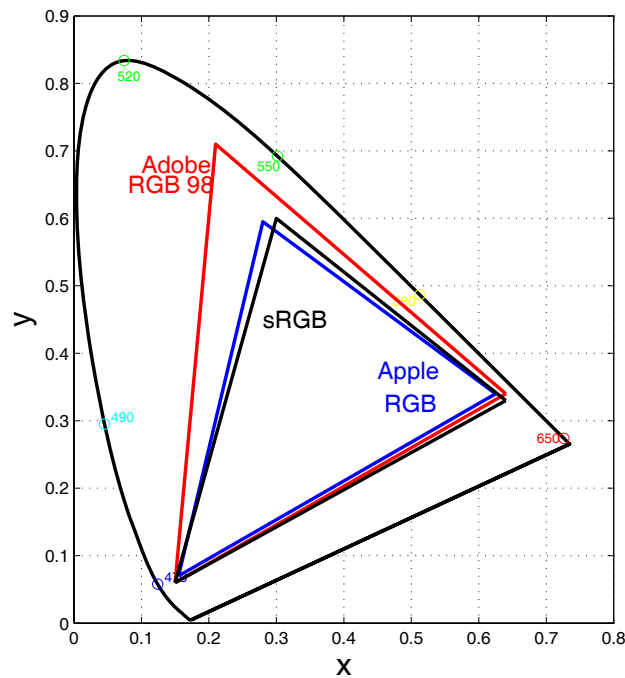


Abbildung 3.2: Verschiedene RGB-Wiedergabefarbräume im chromatischen Diagramm

Ausgehend von den chromatischen Koordinaten lässt sich jeweils eine lineare Transformationsmatrix \mathbf{A}_W herleiten, die die Normfarbwerte X , Y und Z nach

$$\mathbf{t}_W = \begin{bmatrix} R_W \\ G_W \\ B_W \end{bmatrix} = \mathbf{A}_W \cdot \mathbf{t}_{XYZ} = \mathbf{A}_W \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

in den Wiedergabefarbraum abbildet. Gleichmaßen lassen sich mit \mathbf{A}_W die Primärvalenzen des Wiedergabefarbraums als Linearkombination der Normspektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ darstellen. Damit ist der Wiedergabefarbraum hinreichend definiert.

3.2 Mathematische Ansätze zur Farbkorrektur

3.2.1 Zielstellung

Die Farbkorrektur stellt eine Abbildungsvorschrift für alle Farbwerttripel des Aufnahme­farbraums \mathbf{t}_A auf korrespondierende Farbwerttripel im Wiedergabefarbraum \mathbf{t}_W dar. Die Farbwerttripel \mathbf{t}_A ergeben sich nach Beziehung (3.2) als Reaktion des Bildaufnahmesystems auf eine Farbprobenmatrix \mathbf{C}_A , welche unter den Aufnahmebedingungen durch Beleuchtung von Objektspektren \mathbf{B} mit der spektralen Strahlungsverteilung \mathbf{S}_A entsteht.

Unter den Wiedergabebedingungen ist das Beleuchtungsspektrum \mathbf{S}_W durch den Weißpunkt des Wiedergabefarbraums definiert. Damit ergeben sich die zu \mathbf{t}_A korrespondierenden Farbwerttripel \mathbf{t}_W entsprechend der Beziehungen (3.1) und (3.3) zu

$$\mathbf{t}_W = \mathbf{A}_W \cdot \mathbf{s}_{XYZ}^T \cdot \mathbf{S}_W \cdot \mathbf{B} \quad (3.4)$$

Die Zielstellung der Farbkorrektur liegt schließlich in der Ermittlung einer Abbildungsvorschrift, die die Aufnahmetripel \mathbf{t}_A in die entsprechenden Wiedergabetripel \mathbf{t}_W transformiert.

3.2.2 Chromatische Adaption

In den bisherigen Ausführungen wurden ausschließlich die beiden untersten Schichten des Modells in Abbildung 3.1 berücksichtigt. Zur Ermittlung einer Farbkorrektur-Funktion, die dem Adaptionsverhalten des menschlichen Sehsystems an unterschiedliche Beleuchtungen Rechnung trägt, ist eine Erweiterung von Beziehung (3.4) erforderlich, die durch die dritte Schicht repräsentiert wird. Die bisherige Berechnung der Wiedergabetripel würde voraussetzen, dass das HVS die Fähigkeit besäße, eine ideale Anpassung an unterschiedliche Beleuchtungen vorzunehmen. Das würde bedeuten, dass wir unabhängig von der Beleuchtung von jedem Objekt immer den gleichen Farbeindruck bekämen. Diese Zielstellung der Farbkonstanz ist eine wünschenswerte Eigenschaft für maschinelle Prüfsysteme, aber sie entspricht nicht dem menschlichen Empfinden.

Die Modellierung der chromatischen Adaption (CAT⁴) ist ein separates Forschungsgebiet basierend auf physiologischen Untersuchungen. Zur Modellbildung werden Datensätze korrespondierender Farben (Farbwerte) unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen verwendet (s. z. B. [LR99]). Diese chromatischen Adaptions-Transformationen berücksichtigen ausschließlich die Veränderung der Beleuchtung, aber keine anderen visuellen Effekte. Dies ist wiederum die Aufgabe der Farberscheinungsmodelle (CAM, vgl. Abb. 3.1).

Es wurden bereits eine Reihe von CAT-Modellen in der Literatur beschrieben und deren Güte untersucht (s. z. B. [Fai05], [SF05], [FS02], [SHF01], [FD99]). Die meisten lassen sich in ihren Wurzeln auf die Untersuchungen und Aussagen von Johannes von Kries zu Anfang des 20. Jahrhunderts zurückführen. Er verwendete ein sehr einfaches lineares Modell und beschrieb den Adaptionsvorgang als unabhängige Anpassung der drei Zapfenreaktionen im menschlichen Auge

⁴CAT - Chromatic Adaptation Transformation

auf das jeweilige Beleuchtungsspektrum (s. a. [WS82]). Die Zapfenempfindlichkeiten des HVS, bezeichnet mit LMS, leiten sich nach

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{HPE} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad \mathbf{M}_{HPE} = \begin{bmatrix} 0,4002 & 0,7076 & -0,0808 \\ -0,2263 & 1,1653 & 0,0457 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,9182 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

unter Verwendung der Hunt-Pointer-Estevéz Transformation \mathbf{M}_{HPE} aus den Normspektralwertfunktionen ab. Die mathematische Beschreibung des von Kries-Modells lautet dann

$$\begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{HPE}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{L_{W,max}}{L_{A,max}} & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & \frac{M_{W,max}}{M_{A,max}} & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & \frac{S_{W,max}}{S_{A,max}} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{M}_{HPE} \cdot \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

für eine Adaption von der Aufnahmebeleuchtung \mathbf{S}_A zu der Wiedergabebeleuchtung \mathbf{S}_W . Die Farbwerttripel $LMS_{A,max}$ und $LMS_{W,max}$ beziehen sich jeweils auf die Reaktionen des HVS beim Aufnahme- und beim Wiedergabebeleuchtungsspektrum.

Hier soll eine modifizierte Form des von Kries-Modells zur Anwendung kommen, welches sich nur in der Transformationsmatrix \mathbf{M} unterscheidet, aber auf dem gleichen Prinzip basiert. Die Transformation wird als CAT02 bezeichnet und ist Bestandteil des Farberscheinungsmodells CIE-CAM02 (s. [MFH⁺02]). Die Transformationsmatrix lautet hier

$$\mathbf{M}_{CAT02} = \begin{bmatrix} 0,7328 & 0,4296 & -0,1624 \\ -0,7036 & 1,6975 & 0,0061 \\ 0,0030 & 0,0136 & 0,9834 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

und besitzt die Eigenschaft, dass sie zu so genannten „schärferen“ Zapfenempfindlichkeiten (*sharpened cone responsivities*) führt. Diese sorgen für eine bessere Modellierung des Adaptionprozesses im Sinne der korrespondierenden Farbdatensätze.

Unter Berücksichtigung der chromatischen Adaption ist Beziehung (3.4) zu

$$\mathbf{t}_W = \mathbf{A}_W \cdot \mathbf{M}_{CAT02}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{L_{W,max}}{L_{A,max}} & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & \frac{M_{W,max}}{M_{A,max}} & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & \frac{S_{W,max}}{S_{A,max}} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{M}_{CAT02} \cdot \mathbf{s}_{XYZ}^T \cdot \mathbf{S}_A \cdot \mathbf{B} \quad (3.8)$$

zu modifizieren. Mit dieser Formel lässt sich der Adaptionprozess des HVS nach heutigem Kenntnisstand in guter Näherung mathematisch beschreiben.

3.2.3 Abbildungsfunktionen

Zur Abbildung der Farbwerttripel \mathbf{t}_A eines Bildaufnahmesystems auf die korrespondierenden Farbwerttripel \mathbf{t}_W des Wiedergabegerätes wurden bereits eine Reihe verschiedener mathemati-

scher Ansätze in der Literatur veröffentlicht. Im Folgenden werden einige Verfahren beschrieben und ihre Vor- und Nachteile erläutert.

Ein einfacher und weit verbreiteter Ansatz besteht in der linearen Farbraumtransformation entsprechend Beziehung (3.9). Die lineare Abbildung mithilfe einer 3×3 -Matrix wird auch als lineare Matrizierung bezeichnet.

$$\mathbf{t}_W = \begin{bmatrix} R_W \\ G_W \\ B_W \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{t}_A = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} R_A \\ G_A \\ B_A \end{bmatrix} \quad \text{mit} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Da die Primärvalenzen des Wiedergabefarbraums W in der Regel durch Spektralwertfunktionen definiert sind, die keine lineare Abhängigkeit zu den Spektralwertfunktionen des AufnahmeFarbraums aufweisen, ist die Transformationsmatrix \mathbf{A} nicht eindeutig bestimmbar. In diesem Fall, der den typischen Fall für Bildaufnahmesysteme im Bezug zum Normvalenzsystem darstellt, sind Methoden notwendig, um eine unter bestimmten Bedingungen optimale Matrizierung zu finden. Sollte dabei das gewünschte Gütekriterium (s. Kap. 3.4) nicht erfüllt werden, können auch nicht-lineare Transformationen angewendet werden.

Nichtlineare Transformationen können zu einer Verbesserung der Abbildungseigenschaften von Farbraum A zu W führen. Bei der Ermittlung der konkreten Abbildungsvorschrift ist allerdings große Vorsicht geboten, da diese Transformationen eine Verletzung der Lutherbedingung verursachen (s. [Lut27]). Diese Verletzung kann zu Farbortverschiebungen in Abhängigkeit der Intensität eines Farbzeiges führen, die vor allem bei nahezu unbunten Farbwerten sehr gut für den Betrachter wahrnehmbar sind. Eine weitere Gefahr liegt in der Optimierung der Abbildungsvorschrift für einen bestimmten Optimierungsprobensatz (*Training Set*). Während für diesen sehr geringe Abweichungen in der Abbildung zwischen korrespondierenden Farbtupeln erreicht werden, können sich für einen unabhängigen Testprobensatz (*Test Set*) relativ große Fehler herausstellen. Nachfolgend werden einige mathematische Ansätze beschrieben.

Eine Möglichkeit der nichtlinearen Transformation ist durch die Beziehung

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}_W = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \\ R \cdot G \\ G \cdot B \\ B \cdot R \end{bmatrix}_A \quad (3.10)$$

gegeben. Diese Methode wird in [Häf01] beschrieben und angewendet.

Dieser polynomiale Ansatz (MPR - Mehrdimensionale Polynomiale Regression [Kön01]) lässt sich nahezu beliebig erweitern (s. z. B. [WR04]) und in Abhängigkeit der Ordnung des Polynoms sollte sich eine Steigerung der Abbildungsgüte erzielen lassen. In [CWCR04] sind die Autoren

hingegen zu dem Ergebnis gekommen, dass die Nutzung eines Polynoms 3. Ordnung (3×20 -Matrix) das Optimum darstellt. Unter Berücksichtigung praktischer Gesichtspunkte bleibt der polynomiale Ansatz aber nur sehr speziellen Anwendungen unter konstanten Beleuchtungsbedingungen, bei denen in erster Linie eine hohe Farbtreue gefordert wird, vorbehalten. Dies ist des Weiteren im erforderlichen Rechenaufwand zur Korrektur jedes Farbtupels begründet.

Die Methode der neuronalen Netze wird ebenfalls in [CWCR04] untersucht, aber auf Grund des höheren Rechenaufwands ohne Verbesserungen in der Abbildungsgüte gegenüber der Polynom-Methode nicht empfohlen. Deshalb soll an dieser Stelle auch nicht näher darauf eingegangen werden.

Zuletzt sei noch auf die Möglichkeit dreidimensionaler Look-Up Tabellen (LUT) hingewiesen. Eine vollständige 3D-LUT ist sehr aufwendig in der Hardwareumsetzung, da sie große Speicherressourcen benötigt (z. B. für 3×8 Bit: $2^{24} \cdot 24$ Bit). Deshalb wird in der praktischen Umsetzung meist eine gröbere Rasterung des Farbraums gewählt und anschließend zwischen den Gitterpunkten interpoliert. Nach [Qua02], [Hun93] ist bereits eine 3D-LUT mit $5 \times 5 \times 5$ Gitterpunkten ausreichend für ein gutes visuelles Ergebnis, wenn zur Interpolation nichtlineare Methoden angesetzt werden. Unter Verwendung einer linearen Interpolationsmethode wird von Hung eine 3D-LUT mit $33 \times 33 \times 33$ Gitterpunkten als hinreichend für seine Zielstellung befunden. Diese bestand darin, eine optimale Farbproduktion in einem Druckprozess zu erreichen, in dem für einen Drucker und das zu bedruckende Medium ein optimales farbmatisches Modell erzeugt wird.

Zusammengefasst können die hier beschriebenen nichtlinearen Transformationsmethoden für Anwendungen mit konstanten Umgebungsbedingungen einen sinnvollen Ansatz darstellen, beispielsweise bei der digitalen Archivierung von Gemälden ([LL96]). In diesen speziellen Anwendungen ist aber auch die Tendenz zu multispektralen Bildaufnahmesystemen erkennbar (s. z. B. [BTNM05], [BT06]). Für einen allgemeinen Ansatz mit Mechanismen zur dynamischen Anpassung an unterschiedliche Beleuchtungen und damit Aufnahmebedingungen sind lineare Transformationen als einfacher, besser handhabbar und allgemein ausreichend einzustufen.

3.3 Spektrale Anpassung

Die spektrale Empfindlichkeit eines monochromen Bildsensors erstreckt sich typischerweise im sichtbaren Spektralbereich (VIS) und im nahen Infrarot (NIR), in einem Wellenlängenbereich von etwa 300 nm bis 1100 nm. Die verwendeten Farbbildsensoren unterscheiden sich im Wesentlichen nur durch die aufgebrachte Farbfiltermaske von ihren monochromen Pendanten. Während die Farbfiltermaske für eine spektrale Trennung im VIS sorgt, weist sie im NIR in der Regel eine hohe Transmission auf. Dadurch reagiert zunächst jeder Farbbildsensor ohne den Einsatz zusätzlicher optischer Filter auf Strahlung im NIR (vgl. Abb. 2.9).

Da für die Entstehung von Farben nur der VIS-Bereich verantwortlich ist, müssen Farbbildsensoren in einer Weise spektral angepasst werden, in der sie dem spektralen Sehvermögen des menschlichen Auges möglichst ähnlich werden. Aus technischer Sicht wird mittels eines optischen Filters

die Transmission von NIR-Strahlung zum Sensor verhindert. Für diese Aufgabe können prinzipiell zwei unterschiedliche Arten optischer Filter, Absorptions- oder Interferenzfilter, verwendet werden.

Absorptionsfilter erzielen entsprechend ihres Namens ihre spektrale Wirkung in erster Linie durch Absorption. Dieser im Material stattfindende Prozess beschreibt den Zusammenhang zwischen der unmittelbar hinter der Eintrittsfläche vorhandenen Strahlungsleistung Φ_{e1} und der vor der Austrittsfläche Φ_{e2} und wird als innerer Transmissionsgrad oder Reintransmissionsgrad τ_i bezeichnet. Die gesamte Transmission ergibt sich schließlich aus der Reintransmission und den Fresnelschen Grenzflächenreflexionen. Auf Grund des Lambertischen Gesetzes ist der spektrale Reintransmissionsgrad mit

$$\tau_i(\lambda) = \frac{\Phi_{e2}(\lambda)}{\Phi_{e1}(\lambda)} = e^{-\alpha(\lambda) \cdot d} \quad (3.11)$$

von der Dicke d des Filters abhängig. Dabei ist der wellenlängenabhängige Absorptionskoeffizient $\alpha(\lambda)$ eine für das jeweilige Material charakteristische Kenngröße. Bei der Herstellung von Glasfiltern wird $\alpha(\lambda)$ durch die Konzentration verschiedener Beimengungen färbender Substanzen bestimmt. Für die spektrale Anpassung könnten beispielsweise die Farbglasfilter BG39, BG40 oder auch der neuere Typ BG50 der Firma SCHOTT Verwendung finden. In Abbildung 3.3(a) ist die Transmission dieser Gläser bei einer Dicke von $d = 1$ mm dargestellt.

Im Gegensatz zu den Absorptionsfiltern wird bei Interferenzfiltern die nicht durchgelassene Strahlungsleistung reflektiert. Die Filterwirkung entsteht durch das Aufbringen von abwechselnd hoch- und niedrigbrechenden dünnen Schichten auf ein Glassubstrat. Eine wichtige Eigenschaft des Schichtenstapels ist, dass sich der spektrale Reflexionsgrad und der spektrale Transmissionsgrad näherungsweise zu 1 addieren. Auf dieser Basis lassen sich beispielsweise sehr gut spektral selektierende Bandpass- oder Kantenfilter herstellen. Dabei sind für die spektrale Anpassung Kantenfilter interessant, die Strahlung im VIS transmittieren und im NIR reflektieren. Diese werden auch unter der Bezeichnung IR-Sperrfilter geführt. In Abbildung 3.3(a) ist als Beispiel für diese Filterart der Typ Calflex™ X von der Firma unaxis gezeigt.

Die Transmission eines solchen Filters wird nachfolgend durch die Diagonalmatrix \mathbf{f} repräsentiert. Die spektrale Empfindlichkeit des Farbsensors \mathbf{s}_C wird unter Verwendung des zusätzlichen optischen Filters mit

$$\mathbf{s}_{RGB} = \mathbf{f} \cdot \mathbf{s}_C \quad (3.12)$$

zur spektralen Empfindlichkeit \mathbf{s}_{RGB} , welche in allen nachfolgenden Betrachtungen zu Grunde gelegt wird. Da im weiteren Verlauf der Arbeit ausschließlich RGB-Farbbildsensoren in der Betrachtung stehen, wird deren spektrale Empfindlichkeit stets kurz mit \mathbf{s} bezeichnet. Beispielhaft ist in Abbildung 3.3(b) die durch einen BG40 Filter angepasste spektrale Empfindlichkeit des Farbbildsensors Kodak KAI-1020CM im Vergleich zum unangepassten Sensor dargestellt. Der spektrale Transmissionsgrad des Filters hat bedeutenden Einfluss sowohl auf die spektrale Anpassung im Sinne des HVS als auch auf die Gesamtempfindlichkeit des Sensors und die Relation der Farbkanäle zueinander. Deshalb sind Gütekriterien erforderlich, um den unter bestimmten Ge-

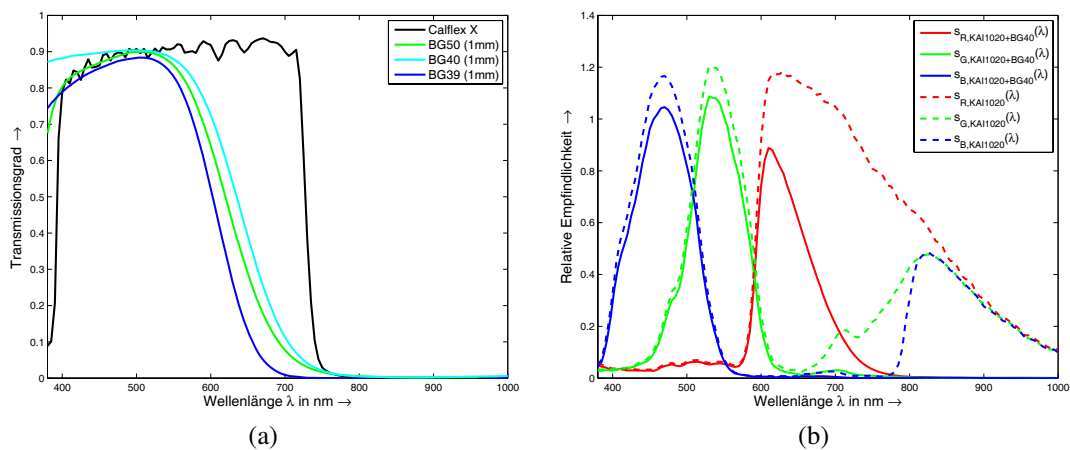


Abbildung 3.3: Der spektrale Transmissionsgrad verschiedener IR-Sperrfilter (a) und die spektrale Anpassung des Kodak KAI-1020CM mit BG40 Filter (b) (normiert für $s_{G,KAI1020}$ bei $\lambda = 560$ nm)

sichtspunkten am besten geeigneten Filter auszuwählen. Diese Gütekriterien stehen auch im Zusammenhang mit der Farbkorrektur-Transformation und werden deshalb nachfolgend eigenständig behandelt.

3.4 Gütekriterien

Es sind Kriterien zur Bewertung der Güte der spektralen Anpassung und der Farbkorrektur-Transformation erforderlich, da diese beiden mehrdimensional veränderbaren Größen einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Farbbildreproduktion haben. Die Qualität lässt sich im Wesentlichen anhand der Merkmale Farbtreue und Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) in den reproduzierten Farbbilddaten beurteilen. Es wurden bereits eine Reihe von Gütekriterien in der Literatur vorgeschlagen, die auf unterschiedliche Weise die beiden genannten Merkmale berücksichtigen. Für das Merkmal der Farbtreue wird stets auf die von der CIE definierten Normspektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$, oder in Matrixschreibweise mit s_{XYZ} bezeichnet, als Referenz Bezug genommen. Im Folgenden werden die vom Autor als wesentlich erachteten Gütekriterien beschrieben und deren Eigenschaften erläutert. Abschließend wird ein neues Kriterium zur Bewertung der Rauschübertragung beschrieben, das auf den Grundlagen der multivariaten Statistik und [BB97] basiert.

3.4.1 Integraler Fehler

Ein einfaches Gütekriterium basierend auf den Spektralwertfunktionen stellt der Integrale Fehler (IF) dar (s. z. B. [Mor97]). Er berücksichtigt nur die Güte der linearen Transformierbarkeit der verwendeten Spektralwertfunktionen zu den Normspektralwertfunktionen. Er ist definiert durch

$$IF_X = \frac{\sum_{i=1}^N \left| \mathbf{s}_{X,i} - \mathbf{A}^{(1)} \cdot \left(\mathbf{s}_{RGB}^{(i)} \right)^T \right|}{\sum_{i=1}^N \left| \mathbf{A}^{(1)} \cdot \left(\mathbf{s}_{RGB}^{(i)} \right)^T \right|} \quad (3.13)$$

für die Normspektralwertfunktion \bar{x} und lässt sich analog für \bar{y} und \bar{z} berechnen. Mithilfe der hochgestellten in Klammern befindlichen Werte wird der Zugriff auf bestimmte Zeilen der Matrizen \mathbf{A} und \mathbf{s} beschrieben. Das Gesamtergebnis kann als integraler Fehlervektor

$$IF = \begin{bmatrix} IF_X & IF_Y & IF_Z \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

dargestellt werden. Dieses Fehler- oder auch Gütekriterium basiert auf dem in [DIN85]/[DIN04] definierten f1-Fehler zur allgemeinen Kennzeichnung der Güte einer Anpassung an den spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$. Der integrale Fehler wird mit $IF_{X,\%} = IF_X \cdot 100\%$ üblicherweise prozentual angegeben.

3.4.2 Farbqualitätsfaktor

Der Farbqualitätsfaktor (CQF⁵) wurde bereits Mitte der neunziger Jahre im Bereich der Scannerkalibrierung und -optimierung praktisch eingesetzt (s. z. B. [ST96], [TSCR96]). Der CQF beurteilt in Analogie zum integralen Fehlerkriterium die Güte der Approximation einer Normspektralwertfunktion durch Linearkombination von K Spektralwertfunktionen eines Aufnahmesystems. Im Gegensatz zum integralen Fehler findet hier aber unter Verwendung der kartesischen Norm eine quadratische Fehlerbewertung statt. Damit ergibt sich nach

$$\begin{aligned} \Delta_{min} &= \left\| \mathbf{s}_X - \mathbf{s}_{RGB} \cdot \left(\mathbf{A}^{(1)} \right)^T \right\|^2 \\ &= \left(\mathbf{s}_X - \mathbf{s}_{RGB} \cdot \left(\mathbf{A}^{(1)} \right)^T \right)^T \cdot \left(\mathbf{s}_X - \mathbf{s}_{RGB} \cdot \left(\mathbf{A}^{(1)} \right)^T \right) \end{aligned} \quad (3.15)$$

eine minimale Abweichung Δ_{min} . In [ST96] wird die Abbildung von \mathbf{s}_{RGB} auf \mathbf{s}_X als orthogonale Projektion beschrieben. Dies entspricht einer Berechnung der Transformationsmatrix \mathbf{A} mit $\mathbf{A} = \mathbf{s}_{XYZ}^T \mathbf{s}_{RGB} (\mathbf{s}_{RGB}^T \mathbf{s}_{RGB})^{-1}$ nach der Methode der kleinsten Quadrate (s. auch Kap. 3.5.1). Während es sich beim integralen Fehler um ein Fehlerkriterium handelt, welches dementsprechend möglichst gering sein sollte, stellt der Farbqualitätsfaktors q_{CQF} ein Gütemaß dar, welches mit dem Wert eins eine maximale Güte anzeigt. Der Farbqualitätsfaktors q_{CQF} ergibt sich nach

$$1 - q_{CQF}(\mathbf{s}_X) = \frac{\Delta_{min}}{\|\mathbf{s}_X\|^2} = 1 - \frac{\mathbf{s}_X^T \mathbf{s}_{RGB} (\mathbf{s}_{RGB}^T \mathbf{s}_{RGB})^{-1} \mathbf{s}_{RGB}^T \mathbf{s}_X}{\mathbf{s}_X^T \mathbf{s}_X} \quad (3.16)$$

durch Normierung der minimalen Abweichung Δ_{min} . Der CQF muss ebenso wie der integrale Fehler für jede Normspektralwertfunktion getrennt berechnet werden und könnte schließlich auch als Gütevektor zusammengefasst werden.

⁵CQF - Color Quality Factor

Zur Bewertung der gesamten Anpassung wurde der so genannte ν -Faktor (oder auch „Vora-measure“) als Gütemaß eingeführt (s. z. B. [Qua02], [ST97], [TSCR96]). Der ν -Faktor ist ähnlich definiert wie der CQF, jedoch werden anstatt der kartesischen Norm jedes einzelnen Differenzvektors die Frobenius-Norm der Differenzmatrix zwischen Normspektralwertfunktionen und einer Linearkombination der Spektralwertfunktionen des Bildaufnahmesystems beurteilt. Das Gütemaß berechnet sich nach

$$\begin{aligned} 1 - \mu(\mathbf{s}) &= \frac{\|\mathbf{s}_{XYZ} - \mathbf{s}_{RGB} \cdot \mathbf{A}^T\|_F^2}{\|\mathbf{s}_{XYZ}\|_F^2} \\ &= 1 - \frac{\text{Spur} \left\{ \mathbf{s}_{XYZ}^T \mathbf{s}_{RGB} (\mathbf{s}_{RGB}^T \mathbf{s}_{RGB})^{-1} \mathbf{s}_{RGB}^T \mathbf{s}_{XYZ} \right\}}{\text{Spur} \left\{ \mathbf{s}_{XYZ}^T \mathbf{s}_{XYZ} \right\}} \end{aligned} \quad (3.17)$$

wiederum unter Berechnung der Transformationsmatrix \mathbf{A} mit $\mathbf{A} = \mathbf{s}_{XYZ}^T \mathbf{s}_{RGB} (\mathbf{s}_{RGB}^T \mathbf{s}_{RGB})^{-1}$ nach der Methode der kleinsten Quadrate.

Ebenso könnte hier auch eine beliebige auf andere Weise berechnete Transformationsmatrix \mathbf{A} berücksichtigt werden.

3.4.3 Farbabstandsformeln

Die bisher vorgestellten Gütekriterien bewerten in erster Linie die spektrale Anpassung des Bildaufnahmesystems auf Basis seiner Spektralwertfunktionen. Sie lassen aber keine direkten Aussagen über die Qualität der gerätespezifischen Farbbewertung in Hinsicht auf das menschliche Sehsystem (HVS) zu, da das Normvalenzsystem keine empfindungsgemäße Gleichabständigkeit aufweist. Im Gegensatz dazu sorgen die nachfolgend dargelegten Farbabstandsformeln für eine Gütebewertung im Sinne des HVS basierend auf dem in Kapitel 2.1.3 beschriebenen CIELAB-Farbraum. Farbabstandsformeln geben ein Maß für den Unterschied oder den Abstand zweier Farborte und beziehen sich damit immer auf einzelne Farbproben. Deshalb wird diese Bewertungsmethode im Gegensatz zu den bisher vorgestellten spektral-basierten Kriterien (*spectral based*) als objekt-bezogenes Kriterium (*target based*) bezeichnet.

Im Zuge der Einführung des CIELAB-Farbraums (s. Bez. (2.6)) wurde mit der Farbabstandsformel

$$\Delta E_{ab} = \left\| \begin{bmatrix} \Delta L^* & \Delta a^* & \Delta b^* \end{bmatrix} \right\| = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (3.18)$$

der euklidische Abstand zwischen den Farborten im CIELAB-Farbraum als geeignetes Maß für eine empfindungsgemäße Bewertung von Farbabweichungen empfohlen (s. z. B. [WS82], [Ric76]).

Auf Grund der späteren Feststellung, dass die Farbabstandsempfindung mit steigender Buntheit $C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$ nachlässt, hat man 1994 die Formel zu

$$\Delta E_{94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C \cdot (1 + 0,045 \cdot \bar{C}^*)} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{k_H \cdot (1 + 0,015 \cdot \bar{C}^*)} \right)^2} \quad (3.19)$$

erweitert. Dabei lassen sich der Buntheitsabstand ΔC^* , der geometrische Mittelwert der Einzelbuntheiten \overline{C}^* und der Bunttonabstand ΔH^* mittels Transformation der Komponenten $L^*a^*b^*$ in Zylinderkoordinaten herleiten (s. z. B. [WS82]). Die so genannten kommerziellen Faktoren k_L , k_C und k_H dienen speziellen Anpassungszwecken und werden bei Standardbedingungen zu $k_L = k_C = k_H = 1$ gesetzt (s. z. B. [Fai05]). Im Jahr 2000 erfolgte die Festlegung einer zusätzlichen, sehr komplexen Erweiterung zur Farbabstandsformel CIEDE2000 [SWD04], die aber an dieser Stelle nicht weiter behandelt werden soll. Eine alternative Bestrebung bestand in der Formulierung einer neuen Transformation, die mit dem Namen DIN99-Formel bezeichnet wurde und nach DIN 6176 genormt ist. Diese Transformation ist eine Fortentwicklung aus dem CIELAB-Farbraum, die für die Farbabstandsmetrik wieder den euklidischen Abstand verwendet [Bür02]. Diese Formel findet allerdings in der Literatur selten Anwendung.

Die Farbabstandsformeln ΔE_{ab} und ΔE_{94} haben die größte Verbreitung gefunden. In dieser Arbeit wird die ΔE_{94} -Formel zur Farbabstandsberechnung eingesetzt, da sie die wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Farbabstandsempfindung bei steigender Buntheit berücksichtigt.

3.4.4 Bewertung von Farbrauschen

Zur Bewertung der Güte einer Abbildungsvorschrift sollen in dieser Arbeit zwei Kriterien berücksichtigt werden. Während alle bisher vorgestellten Gütekriterien ausschließlich die Farbtreue oder zumindest die Transformierbarkeit ins Normvalenzsystem beurteilen, soll nun noch eine Methode zur Bewertung des Rauschübertragungsverhaltens betrachtet werden. Die Methode basiert auf den Ausführungen in [BB97].

Die Farbtripel \mathbf{t}_A unterliegen einer statistischen Unsicherheit auf Grund der Rauschprozesse bei der Bildaufnahme (vgl. Kap. 2.2.5). Das Rauschen folgt einer statistischen Verteilung, die mit der Varianz σ^2 bemaßt werden kann. Das Rauschen in den Daten eines mehrkanaligen Bildaufnahme-systems kann entsprechend der multivariaten Statistik durch eine Kovarianzmatrix Σ mit

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12}^2 & \sigma_{13}^2 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2 & \sigma_{23}^2 \\ \sigma_{31}^2 & \sigma_{32}^2 & \sigma_{33}^2 \end{bmatrix} \quad \text{für } K = 3 \quad (3.20)$$

beschrieben werden. Die Hauptdiagonale repräsentiert die Varianzen in jedem Kanal k des Bildaufnahme-systems. Die Matrix Σ ist symmetrisch, so dass $\sigma_{ij}^2 = \sigma_{ji}^2$ gilt. Wenn die Kanäle eine stochastische Unabhängigkeit aufweisen, ist Σ eine Diagonalmatrix.

Unter Verwendung einer linearen Transformation von \mathbf{t}_A zu \mathbf{t}_W nach Beziehung (3.9) resultiert nach multivariater Statistik aus einer statistischen Verteilung mit Σ_A in \mathbf{t}_A eine Kovarianzmatrix

$$\Sigma_W = \mathbf{A} \cdot \Sigma_A \cdot \mathbf{A}^T \quad (3.21)$$

für die Wiedergabetripel \mathbf{t}_W ([BB97]).

Die Bewertung des Rauschens oder des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) in Farbbilddaten soll

auf eine Analyse von entsprechend der menschlichen Wahrnehmung transformierten Grau- oder Luminanzwerten zurückgeführt werden. Diese Luminanzbewertung soll auf den Normfarbwerten Y basieren, welche nach CIE und DIN der fotometrischen Bewertung von spektralen Strahlungsverteilungen entspricht. Nach Beziehung (3.3) lassen sich die Normfarbwerte Y aus den Farbtripeln \mathbf{t}_W durch Anwendung der zweiten Zeile der Inversen von \mathbf{A}_W nach

$$Y = \mathbf{A}_W^{-1(2)} \cdot \mathbf{t}_W = \mathbf{A}_Y \cdot \mathbf{t}_W \quad (3.22)$$

berechnen. So werden die Farbwerttripel in ein Skalar transformiert, welches dann univariat verteilt ist. Daraus folgt für die Bewertung des Rauschens die skalare Größe der Varianz

$$\sigma_Y^2 = \mathbf{A}_Y \cdot \Sigma_W \cdot \mathbf{A}_Y^T \quad \text{mit} \quad \mathbf{A}_Y = \mathbf{A}_W^{-1(2)} = \begin{bmatrix} a_R & a_G & a_B \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

für die Luminanzwerte Y . Schließlich soll zur Beurteilung der Güte des Rauschübertragungsverhaltens die Veränderung p des SNR durch die Transformation betrachtet werden. Diese ergibt sich nach

$$p = \frac{\mathbf{A}_Y \cdot \mathbf{t}_W}{\sqrt{\mathbf{A}_Y \cdot \Sigma_W \cdot \mathbf{A}_Y^T}} \cdot \frac{\sqrt{\mathbf{A}_Y \cdot \Sigma_A \cdot \mathbf{A}_Y^T}}{\mathbf{A}_Y \cdot \mathbf{t}_A} \quad (3.24)$$

als Verhältnis des SNR nach der Transformation zu dem vor der Transformation. Um die Beurteilung des Resultats zu vereinfachen, wird die Veränderung des SNR nach

$$p\% = (p - 1) \cdot 100 \quad (3.25)$$

prozentual angegeben.

3.5 Optimierungswerkzeuge

An dieser Stelle werden Optimierungswerkzeuge vorgestellt, die sowohl zur Berechnung einer optimalen Lösung für die Abbildung von Farbwerttripeln des Aufnahme farbraums \mathbf{t}_A auf die des Wiedergabefarbraums \mathbf{t}_W als auch zur indirekten Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit eines Farbbildaufnahmesystems herangezogen werden sollen. Dabei kommen Optimierungsalgorithmen zum Einsatz, die sonst allgemein im Bereich der Unternehmensforschung (Operations Research) angewendet werden, zum Beispiel für typische Probleme der Logistik. Zunächst wird aber mit einem Standardverfahren in der Messdatenauswertung begonnen.

3.5.1 Methode der kleinsten Quadrate

Die Methode der kleinsten Quadrate (LSQ⁶) wurde erstmals zu Beginn des 19. Jahrhunderts von Carl Friedrich Gauß zum Ausgleich von Messfehlern verwendet. Sie dient im Allgemeinen der Ausgleichsrechnung und wird beispielsweise bei vielen Problemen angewendet, bei denen eine

⁶LSQ - Least-Square Regression

Modellfunktion möglichst optimal an eine Messwertreihe anzupassen ist (s. auch [HH92]). Dabei werden mithilfe dieser Methode die Parameter der Modellfunktion durch Minimierung der Quadratsumme der Abweichungen zu den Messwerten bestimmt.

In der mehrdimensionalen Messwertanalyse lässt sich das Verfahren nach

$$\min \sum_{j=1}^O (p_j - \mathbf{c} \cdot \mathbf{Q}_j)^2 \quad (3.26)$$

auch dazu einsetzen, einen Vektor $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^n$ so zu approximieren, dass die Quadratsumme der Abweichungen zwischen jedem Referenzwert p_j und dem Skalarprodukt aus \mathbf{c} und dem jeweiligen Messvektor $\mathbf{Q}_j \in \mathbb{R}^n$ minimal wird.

Unter Nutzung der kartesischen Norm lässt sich Beziehung (3.26) auch schreiben als

$$\min \|\mathbf{p} - \mathbf{c} \cdot \mathbf{Q}\|^2 = (\mathbf{p} - \mathbf{c} \cdot \mathbf{Q}) \cdot (\mathbf{p} - \mathbf{c} \cdot \mathbf{Q})^T \quad (3.27)$$

mit dem Referenzwert-Zeilenvektor $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^O$ und der $n \times O$ -Matrix \mathbf{Q} , die alle Messvektoren enthält. Nach der Methode der kleinsten Quadrate kann nun \mathbf{c} direkt nach

$$\mathbf{c} = \mathbf{p} \cdot \mathbf{Q}^T \cdot (\mathbf{Q} \cdot \mathbf{Q}^T)^{-1} \quad (3.28)$$

aus \mathbf{p} und \mathbf{Q} berechnet werden. Dabei ist die Überbestimmtheit des Gleichungssystems eine zwingende Voraussetzung. Es sind folglich mehr Messvektoren zu erfassen als Elemente von \mathbf{c} zu ermitteln sind ($O > n$).

3.5.2 Inverse Verfahren

Auf dem Ansatz der Methode der kleinsten Quadrate basieren auch die so genannten inversen Verfahren. Würde man bei der oben betrachteten Erfassung von Messwerten gerade genau so viele Messvektoren erfassen wie der gesuchte Vektor \mathbf{c} Elemente enthält und wären diese linear unabhängig, dann wäre die Matrix \mathbf{Q} quadratisch und man könnte ihre Inverse direkt berechnen. Es muss hier aber davon ausgegangen werden, dass zum Beispiel auf Grund von Unsicherheiten in den Messwerten durch Rauschprozesse mehr Messungen durchgeführt werden müssen als Elemente von \mathbf{c} zu ermitteln sind. Da dann \mathbf{Q} nicht quadratisch ist, existiert keine Inverse \mathbf{Q}^{-1} , sondern es bleibt nur die Möglichkeit, eine Pseudoinverse \mathbf{Q}^+ zu bilden. Der einfachste Ansatz der Moore-Penrose-Inversen basiert nach

$$\mathbf{Q}^+ = \mathbf{Q}^T \cdot (\mathbf{Q} \cdot \mathbf{Q}^T)^{-1} \quad \text{für } O > n \quad (3.29)$$

auf einer Minimierung der kartesischen Norm und entspricht damit der Methode der kleinsten Quadrate (vgl. Bez. (3.28)).

Der numerische Ansatz zur Berechnung von \mathbf{Q}^+ erfolgt meistens durch eine Singulärwertzerlegung (SVD⁷) nach

$$\mathbf{Q} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{V}^T \quad (3.30)$$

in die Orthonormalmatrizen \mathbf{U} und \mathbf{V} und die Diagonalmatrix \mathbf{D} , die in der Hauptdiagonale nur positive Werte in absteigender Reihenfolge enthält. Diese Werte werden als Singulärwerte bezeichnet. Die Pseudoinverse \mathbf{Q}^+ wird dann nach

$$\mathbf{Q}^+ = (\mathbf{U} \cdot \mathbf{D}^* \cdot \mathbf{V}^T)^T \quad \text{mit } \mathbf{D}^* = \begin{cases} \frac{1}{d_{ii}} & \text{für } d_{ii} > 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3.31)$$

unter Invertierung der Singulärwerte gebildet. Dieser Ansatz stellt die Grundlage für viele weitere inverse Verfahren dar.

3.5.3 Lineare Optimierung

Das Ermitteln einer optimalen Lösung zum Beispiel zur Abbildung von Messwertreihen auf Referenzwerte kann aber auch unter Einsatz von Optimierungsalgorithmen geschehen. Eine der klassischen Methoden ist die lineare Programmierung (LP).

Die lineare Programmierung dient der Lösung linearer Optimierungsprobleme (LOP). Ein LOP ist eine Extremwertaufgabe mit Nebenbedingungen (NB), zu deren Lösung eine lineare Zielfunktion unter Berücksichtigung von Nebenbedingungen in Form linearer Gleichungen und Ungleichungen zu maximieren oder minimieren ist. Da jede Maximierung in eine Minimierung überführt und jede Gleichung durch Ungleichungen ausgedrückt werden kann, lässt sich jedes LOP in der Normalform

$$\begin{aligned} & \min \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{x} \\ \text{s.t. } & \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \\ & \mathbf{lb} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{ub} \end{aligned} \quad (3.32)$$

beschreiben. Dabei werden durch $\mathbf{f}^T \cdot \mathbf{x}$ die zu minimierende Zielfunktion und durch $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}$ die Nebenbedingungen definiert. Zusätzlich können durch die Vektoren \mathbf{lb} (lower bound) und \mathbf{ub} (upper bound) eine untere und eine obere Schranke für den gesuchten Vektor \mathbf{x} angegeben werden. Die klassische Lösungsmethode eines LOP ist die so genannte Simplexmethode. Diese Methode lässt sich auf Kantorowitsch (1939) und Dantzig (1947) zurückführen. Sie basiert auf der Idee, sich ausgehend von einem Eckpunkt der Lösungsmenge stets zu einem benachbarten Eckpunkt zu bewegen, bis ein optimaler Eckpunkt erreicht ist. Dieser Eckpunkt stellt das globale Minimum des LOP dar.

Im Laufe der Jahrzehnte wurden die Algorithmen weiterentwickelt, und im Zeitalter der numerischen Mathematik ist mit den heute zur Verfügung stehenden Rechenleistungen eines Standard-Computers auch die Lösung höherdimensionaler Probleme mit begrenztem Zeitaufwand möglich. Für solche Probleme werden heute häufig Innere-Punkt-Verfahren verwendet. Das im Rahmen

⁷SVD - Singular Value Decomposition

dieser Arbeit eingesetzte Softwarepaket MATLAB[®] von The MathWorks besitzt in seiner Erweiterung durch die *Optimization Toolbox* die Fähigkeit, lineare Optimierungsprobleme durch lineare Programmierung zu lösen. In diesem Zusatzpaket sind verschiedene Algorithmen zur Lösung von LOPs implementiert, die in Abhängigkeit der Dimension des LOP angewendet werden (s. z. B. [Zha97]). Zur Anwendung eines Algorithmus ist das LOP zunächst in die Normalform nach Beziehung (3.32) zu überführen.

3.5.4 Quadratische Optimierung

Als Erweiterung der linearen Optimierung bietet die quadratische Optimierung zusätzliche Möglichkeiten, zum Beispiel die Produktbildung aus verschiedenen Komponenten oder einfach nur die quadratische Bewertung eines Fehlerkriteriums wie bei der Methode der kleinsten Quadrate. Die Formulierung quadratischer Optimierungsprobleme (QOP) vereint dadurch die Vorteile der linearen Optimierung und der Methode der kleinsten Quadrate. Solche quadratische Formen (auch Quadriken genannt [Opf94]) erhält man unter Nutzung von Matrixmultiplikationen nach

$$\mathbf{x}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{x} \quad (3.33)$$

mit der quadratischen Matrix \mathbf{H} . Unter Erweiterung des LOP in Beziehung (3.32) durch die quadratische Form lässt sich nach

$$\begin{aligned} \min \quad & \frac{1}{2} \cdot \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{x} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b} \\ & \mathbf{lb} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{ub} \end{aligned} \quad (3.34)$$

das QOP in seiner Normalform beschreiben.

In der MATLAB *Optimization Toolbox* werden beispielsweise Algorithmen zur Lösung von quadratischen Optimierungsproblemen zur Verfügung gestellt. Unter dem Aspekt einer minimalen Verarbeitungszeit ist bei komplexeren Aufgabenstellungen die Verwendung des so genannten large-scale Algorithmus vorteilhaft. Dieser kann allerdings nur Probleme der Form

$$\begin{aligned} \min \quad & \frac{1}{2} \cdot \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{H} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{f}^T \cdot \mathbf{x} \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b} \end{aligned} \quad (3.35)$$

lösen. Mit der Zielstellung einer geringen Zeit zur Lösungsfindung sind deshalb stets Gleichungen als Nebenbedingungen anzustreben.

4 Indirekte Bestimmung der spektralen Kameraempfindlichkeit

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zur Entwicklung und Bewertung von Methoden zur indirekten spektralen Charakterisierung eines Bildaufnahmesystems vorgestellt. Unter einer spektralen Charakterisierung wird die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit s einer Kamera beziehungsweise ihres Bildaufnahmesystems verstanden.

Der aus signaltheoretischer Sicht scheinbar einfachste Weg wäre durch Vorgabe monochromatischer Reizfunktionen einzelne Stützstellen der Empfindlichkeitsfunktion direkt zu ermitteln. Diese klassische Methode der monochromatischen Messung der spektralen Empfindlichkeit ist ein aufwendiges, zeit- und kostenintensives Verfahren. Es ist damit ungeeignet für den Einsatz in der Kamerafertigung zur optimalen Auslegung jedes individuellen Bildaufnahmesystems. Des Weiteren stellt diese Art der optischen Anregung nicht den typischen Anwendungsfall sondern eher einen physikalischen Grenzfall dar. Dadurch kann die damit verbundene Charakterisierung des Bildaufnahmesystems unter Umständen nur für diesen Grenzfall gelten und für den typischen Anwendungsfall größere Abweichungen beinhalten.

Deshalb beschäftigt sich diese Arbeit mit der indirekten Messmethode, einer Schätzung der spektralen Kameraempfindlichkeit, die schneller und kostengünstiger einsetzbar ist, und im Sinne der Anwendung ebenso genaue Ergebnisse wie die direkte Messmethode erzielen kann. Die indirekte Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit basiert auf der Auswertung von Kamerareaktionen auf spektral breitbandige Farbproben. Dabei können verschiedene algorithmische Ansätze gewählt werden, um aus den Reaktionen und den spektralen Funktionen der Farbproben die spektrale Empfindlichkeit zu schätzen.

In diesem Kapitel wird zunächst ein Simulationsmodell aufgestellt, um die Problemstellung mathematisch zu beschreiben. Anschließend werden verschiedene Ansätze zur Lösung des Problems vorgestellt und die eigene Methode beschrieben und analytisch betrachtet. Ein Teilproblem dieser indirekten Messmethode stellt die Auswahl eines geeigneten Satzes von Farbproben dar, welchem sich in einem weiteren Unterkapitel zugewendet wird. Abschließend werden verschiedene Ansätze zur Bewertung der Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

4.1 Simulationsmodell zur indirekten Spektralmessung

Zur Schätzung der spektralen Empfindlichkeit wird ein Modell für das Bildaufnahmesystem benötigt. Dieses besteht nach Kapitel 2 aus dem Bildsensor und der notwendigen Analogelektro- nik einschließlich des Analog-Digital-Umsetzers (ADC). Die Spektralschätzung erfolgt also direkt auf Basis der digitalisierten Sensorrohdaten, ohne, wie in anderen Arbeiten (z. B. [Kön01], [VFTB97a]), nachgeschaltete Verarbeitungsalgorithmen berücksichtigen zu müssen. Unter der Voraussetzung eines linearen Bildaufnahmesystems ($\mathcal{F}(t) = t$) ergeben sich nach Beziehung (2.28) die Reaktionen

$$\mathbf{r}_{sim} = \mathbf{t}_{sim} = \mathbf{s}^T \cdot \mathbf{C} + \xi \quad \text{mit} \quad \mathbf{C} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{B} \quad (4.1)$$

auf einen Satz von Objektspektren \mathbf{B} unter der Beleuchtung \mathbf{S} . Entsprechend der Objektanzahl O und der Farbkanäle K des Bildaufnahmesystems resultiert eine $K \times O$ - Matrix der Farbwertre- aktionen (hier gilt $K = 3$ für die verwendeten RGB-Sensoren). Mit ξ wird eine Unsicherheit in der Kamerareaktion r additiv hinzugefügt. Die Unsicherheit ξ ist eine Zufallsgröße deren stochas- tische Verteilung sich in dieser Arbeit aus dem Dunkelsignalrauschen mit σ_{dark} , dem Photonen- rauschen mit σ_p und der PRNU mit σ_{PRNU} zusammensetzt.

In der Simulation werden die Kamerareaktionen ausgehend von in Datenblättern als typisch ange- gebenen spektralen Funktionen berechnet. Die Simulation orientiert sich bereits an den Kompo- nenten, die später in einem Messaufbau verwendet werden sollen. Als Bildsensor wird der KAI- 1020CM von Kodak (s. [Eas07]) mit einem 1 mm starken Absorptionsfilter BG40 von SCHOTT (s. [SCH04]) zur spektralen Anpassung zum Einsatz kommen (vgl. Abb. 3.3). Zusätzlich wird die spektrale Transmission des verwendeten Messobjektivs berücksichtigt. Die Erzeugung der spektral breitbandigen Strahlungsfunktionen in \mathbf{C} erfolgt unter Verwendung einer Wolfram-Ha- logen-Lichtquelle und einem zusätzlichen optischen Filter mit dem Ziel, eine möglichst konstante Verteilung der Strahlungsleistung über den spektralen Messbereich zu erreichen. Für die im Rah- men dieser Arbeit entwickelte indirekte Charakterisierungsmethode hat sich der Messbereich von 380 bis 750 nm als geeignet erwiesen (vgl. Abb. 4.1). Die resultierende spektrale Strahlungslei- stung ist in Abbildung 4.1(a) dargestellt und wird durch die Diagonalmatrix \mathbf{S} repräsentiert. Als Objekte dienen Roscolux-Filterfolien von der Firma rosco. In der Simulation kommen zunächst 196 verschiedene Filterfolien zum Einsatz. In Abbildung 4.1(b) wird die spektrale Transmission von 98 zufällig ausgewählten Filterfolien gezeigt.

Zur Berücksichtigung realistischer Rauschkenngrößen werden weitere Datenblattinformationen und vorhandene Messdaten (s. Kap. 2.3) einbezogen. Zur Simulation der Unsicherheit ξ werden statistische Verteilungen mit dem Erwartungswert $\mu = 0$ und den jeweiligen Standardabweichun- gen nach Tabelle 4.1 für jeden Signalwert einer Kamerareaktion in einer Anzahl von Elektronen erzeugt. Dazu sind die nach $\mathbf{s}^T \cdot \mathbf{C}$ berechneten Werte in eine Ladungsträgeranzahl n_e zu über- führen, so dass die maximale Ladungsträgeranzahl kleiner als die Full-Well-Kapazität $n_{e,FW}$ ist. Anschließend ist ein Zufallsexperiment durchzuführen, in welchem Pseudozufallszahlen für die

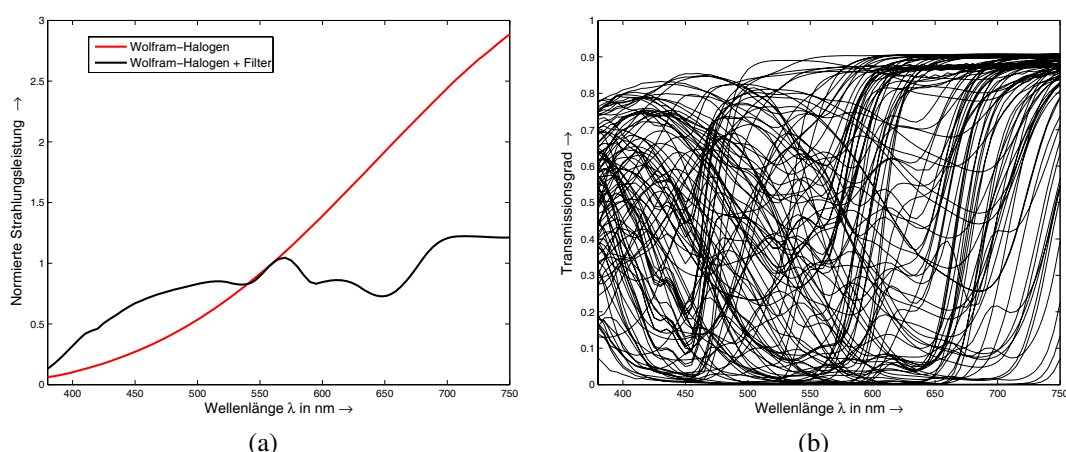


Abbildung 4.1: Spektrale Strahlungsleistung einer Wolfram-Halogen-Lichtquelle ohne und mit Filter (a) und Transmissionsgrad einiger Roscolux-Filterfolien (b)

angeführten Wahrscheinlichkeitsverteilungen generiert werden. Zu jeder Rauschkenngröße wird eine Menge von 625 (25×25 Pixel) Werten erzeugt, deren Elementarereignisse aufsummiert und anschließend eine Mittelung über die Stichprobe durchgeführt. Dies führt zu einer Unsicherheit ξ , die für jede Reaktion eines Kamerafarbkkanals auf eine Farbprobe zu generieren ist.

Dunkelsignalrauschen	$\sigma_{e,dark} = 40 e^-$
Photonenrauschen	$\sigma_{e,p} = \sqrt{n_e}$
PRNU	$\sigma_{e,PRNU} = 0,02 \cdot n_e$

Tabelle 4.1: Rauschkenngrößen für die Simulation eines Kodak KAI-1020CM

Das Ziel der Simulation besteht zunächst darin, die im Modell bekannte spektrale Empfindlichkeit s mithilfe der im nächsten Unterkapitel vorgestellten Algorithmen aus den durch ξ verrauschten Kamerareaktionen r_{sim} zu ermitteln. Die weitere Zielsetzung beinhaltet die Bestimmung eines verringerten Satzes von Farbproben, der als optimal für die indirekte Spektralmessung erachtet wird (s. Kap. 4.3).

4.2 Methoden zur indirekten Spektralmessung

Es gibt bereits eine Reihe von Methoden zur indirekten Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit einer Kamera ausgehend von ihren Reaktionen auf spektral breitbandige Farbproben. Die Methoden sollen auch als spektrale Schätzverfahren oder kurz als Spektralschätzung bezeichnet werden. Dabei wurde bereits mehrfach gezeigt, dass nur durch die Berechnung der Moore-Penrose-Inversen C^+ nach Beziehung (3.29) ohne Berücksichtigung von Nebenbedingungen kaum ein brauchbares Ergebnis zu erzielen ist (vgl. Abb. 4.2(a)).

Unter der Voraussetzung, dass die Anzahl der Farbproben O größer ist als die der gesuchten Stützstellen N der Empfindlichkeitsfunktionen und eine lineare Unabhängigkeit von N aus O Farbproben gegeben ist, handelt es sich zwar um ein überbestimmtes Gleichungssystem und somit ein gutartig gestelltes Problem, aber dessen Lösung ist sehr stark vom Rauschen in \mathbf{r}_{sim} abhängig. Deshalb wurden von verschiedenen Autoren zusätzliche Nebenbedingungen vorgeschlagen und auch unterschiedliche mathematische Verfahren zur Lösungsbestimmung eingesetzt (s. z. B. [DMT04], [PHI⁺04], [BF02], [Kön01], [Bar99], [FHH98], [ST93], [VFTB97b]). Nachfolgend werden verschiedene Methoden vorgestellt und in einer abschließenden Diskussion das unter den für diese Arbeit relevanten Gesichtspunkten beste Verfahren herausgearbeitet.

4.2.1 Inverse Verfahren

Ein naheliegender Ansatz zur Ermittlung von \mathbf{s} aus \mathbf{r}_{sim} und \mathbf{C} stellt die Invertierung des Gleichungssystems aus Beziehung (4.1) dar. Die Methoden zur Schätzung von \mathbf{s} durch Berechnung einer Inversen von \mathbf{C} werden als inverse Verfahren bezeichnet (vgl. Kap. 3.5.2). Da die Farbprobenmatrix \mathbf{C} in der Regel nicht quadratisch ist, existiert keine Inverse \mathbf{C}^{-1} , sondern es bleibt nur die Möglichkeit, eine Pseudoinverse \mathbf{C}^+ zu bilden. Der einfachste Ansatz der Moore-Penrose-Inversen nach Beziehung (3.29) liefert für diese Problemstellung kein befriedigendes Ergebnis für \mathbf{s} , da es ohne Randbedingungen durch das Rauschen in \mathbf{r}_{sim} dominiert wird (s. Abb. 4.2(a)). Sie stellt aber die Grundlage für alle weiteren inversen Verfahren dar.

In [DMT04] wird basierend auf der Singulärwertzerlegung (SVD) nach den Beziehungen (3.30) und (3.31) eine Rekonstruktion von \mathbf{s} nach

$$\mathbf{s}_{SVD} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{D}^* \cdot \mathbf{V}^T \cdot \mathbf{r}_{sim}^T \quad \text{mit } \mathbf{D}^* = \begin{cases} \frac{1}{d_{ii}} & \text{für } \frac{d_{ii}}{d_{11}} > \alpha \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.2)$$

angestrebt. Die nach dieser Methode geschätzten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen werden mit \mathbf{s}_{SVD} bezeichnet. Der einstellbare Schwellwert α dient zur Beschränkung des Rangs der Diagonalmatrix \mathbf{D} , weshalb die Methode auch als rang-beschränkte Pseudoinverse (*rank-deficient pseudoinverse*) bezeichnet wird (s. a. [HBS98]). Die Rang-Beschränkung dient der Reduzierung des Freiheitsgrades der Lösung, welche auch eine Minderung des Rauscheinflusses bedeutet. Dieser Ansatz wurde bereits in [ST93] zur Scannercharakterisierung herangezogen und die SVD wird ebenfalls zur Gütebewertung einer Farbprobenmatrix verwendet (s. Kap. 4.3). In Abbildung 4.2 ist das Ergebnis der rang-beschränkten Pseudoinversen dem der Moore-Penrose-Inversen gegenübergestellt. Für die rang-beschränkte Pseudoinverse wurden 100 Simulationsläufe mit jeweils zufälligen Unsicherheiten ξ durchgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu prüfen. In Abbildung 4.2(b) sind alle 100 ermittelten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen dargestellt.

Weitere Verbesserungen in der Schätzung von \mathbf{s} lassen sich durch die Ausnutzung von Kenntnissen über deren gewöhnliche Besetzung erreichen. Unter der Betrachtung breitbandiger Spektren, die eine Voraussetzung dieser Arbeit darstellt, kann den spektralen Sensorempfindlichkeitsfunktionen

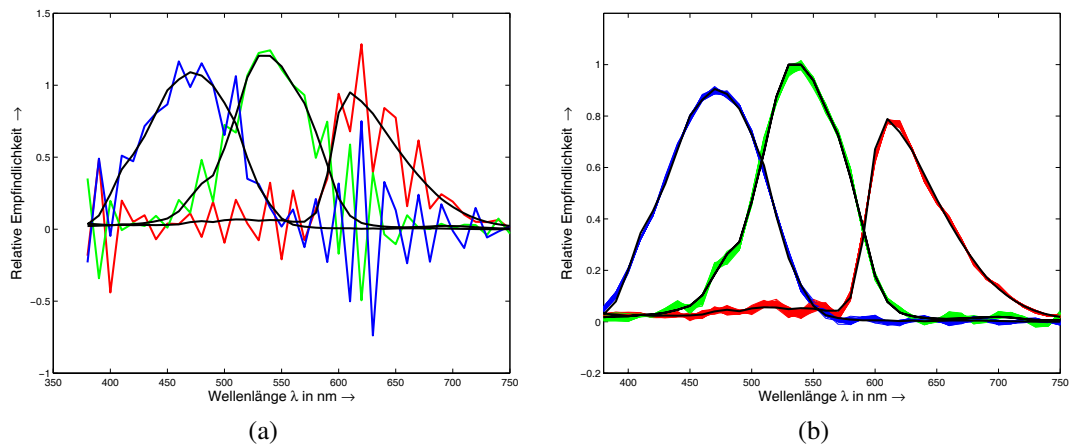


Abbildung 4.2: Schätzung der spektralen Empfindlichkeit mittels Pseudoinverse (a) und mit Rang-Beschränkung $\alpha = 0,004$ (b)

ein glatter Verlauf als typische Eigenschaft zugewiesen werden. Diese Eigenschaft lässt sich folgendermaßen zur Einschränkung der Lösung nutzen. Ein Maß für die Glattheit einer Funktion ist deren zweite Ableitung. Eine gute Näherung der zweiten Ableitung für diskrete Funktionen sind die zweiten Differenzen, welche sich nach

$$\Delta_{k,i} = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_{k,i-1} & s_{k,i} & s_{k,i+1} \end{bmatrix}^T \quad \forall k, 2 \leq i \leq N-1 \quad (4.3)$$

berechnen lassen. Zur Anwendung dieses Kriteriums kann das Verfahren der geglätteten Inversen verwendet werden. Nach [Kön01] lässt sich zwar ein Weg zur Umsetzung dieses methodischen Ansatzes finden, aber es werden hier bereits sehr schnell die Grenzen einer flexiblen Erweiterbarkeit der inversen Verfahren durch zusätzliche Nebenbedingungen deutlich. Nachfolgend sollen deshalb alternative Verfahren unter Nutzung von Optimierungsalgorithmen vorgestellt werden.

4.2.2 Lineare Optimierung

Die Methode der linearen Optimierung stellt einen eleganten Ansatz zur Schätzung von s dar, weil sie eine gezielte Optimierung in Abhängigkeit spezieller Nebenbedingungen ermöglicht. Einige der bereits in [Kön01] aufgezeigten Möglichkeiten sollen hier aufgenommen und weiterentwickelt werden. Gegenüber dem in [Kön01] aufgestellten Modell eines geschlossenen Scanners besitzt das im Kontext dieser Arbeit aufgestellte Modell einer offen zugänglichen Kamera eine wesentliche Vereinfachung. Es muss hier keine nichtlineare Übertragungsfunktion, wie zum Beispiel eine Gamma-Korrektur¹, berücksichtigt werden, so dass das Modell durch einen einstufigen Prozess beschrieben (vgl. Bez. (4.1)) und auf die Schätzung einer inversen Transformationsmatrix verzichtet werden kann. In [Kön01] bleibt aber die wichtige Fragestellung nach einer Methode zur Auswahl für das Verfahren geeigneter Farbproben unklar. Diese Problemstellung ist Gegenstand

¹Anpassung der Bilddaten an ein Wiedergabegerät, zum Beispiel einen Röhrenmonitor, durch eine Funktion $y = x^\gamma$

von Kapitel 4.3.

Im Gegensatz zum Minimierungskriterium der kartesischen Norm bei der Bildung einer Pseudoinversen (vgl. Bez. (3.29)) ist bei der linearen Programmierung (LP) eine lineare Zielfunktion erforderlich (vgl. Kap. 3.5.3). Deshalb soll hier die Summe der Beträge der Abweichungen entsprechend

$$\min \sum_{j=1}^O |r_{sim,k,j} - \mathbf{s}_{LP,k}^T \cdot \mathbf{c}_j| \quad \forall k \quad (4.4)$$

minimiert werden, um eine Schätzung \mathbf{s}_{LP} der spektralen Sensorempfindlichkeit \mathbf{s} zu ermitteln. Die Vektoren \mathbf{c}_j enthalten die einzelnen Farbprobenspektren, aus denen sich die Farbprobenmatrix \mathbf{C} zusammensetzt und $r_{sim,k,j}$ bezeichnet die Reaktion des Bildaufnahmekanals k auf die Farbprobe j . Durch die lineare Bewertung bekommen größere Abweichungen einen geringeren Einfluss auf die Optimallösung als bei einer quadratischen Bewertung. Diese Tatsache muss nicht zwangsläufig von Nachteil sein. Da die Minimierung von Beträgen nicht direkt möglich ist, besteht die Notwendigkeit einer mathematischen Umformung. Dazu werden die betragsmäßigen Differenzen der Hilfsgröße δ mit

$$\delta_{k,j} = |r_{sim,k,j} - \mathbf{s}_{LP,k}^T \cdot \mathbf{c}_j| \quad (4.5)$$

zugewiesen. Weiterhin wird die Gesetzmäßigkeit ausgenutzt, dass sich eine Gleichung durch zwei Ungleichungen beschreiben lässt. Da die Summe der $\delta_{k,j}$ jeweils minimiert werden soll, genügt die Ungleichung

$$\delta_{k,j} \geq |r_{sim,k,j} - \mathbf{s}_{LP,k}^T \cdot \mathbf{c}_j| \quad \forall j, k \quad (4.6)$$

die sich wiederum in die Ungleichungen

$$\delta_{k,j} \geq r_{sim,k,j} - \mathbf{s}_{LP,k}^T \cdot \mathbf{c}_j \geq -\delta_{k,j} \quad \forall j, k \quad (4.7)$$

überführen lässt. Damit kann eine Schätzung von \mathbf{s}_{LP} durch Minimierung von $\sum \delta_j$ getrennt für jeden Kanal k mit den Nebenbedingungen in Beziehung (4.7) erfolgen. Neben der mittleren betragsmäßigen Abweichung kann auch zusätzlich die maximale Abweichung minimiert werden. Mithilfe des Ansatzes

$$\delta_{k,max} \geq \delta_{k,j} \quad \forall k, j \quad (4.8)$$

und der Zielfunktion

$$\min \omega_{max} \cdot \delta_{k,max} + \frac{\omega_{avg}}{O} \cdot \sum_{j=1}^O \delta_{k,j} \quad (4.9)$$

kann eine gewichtete Minimierung von mittlerer und maximaler Abweichung erreicht werden. Dabei unterliegen die Gewichte ω_{avg} und ω_{max} einer heuristischen Ermittlung.

Die Berücksichtigung des Glattheitskriteriums auf Basis der zweiten Differenzen nach Beziehung (4.3) lässt sich wie folgt in das lineare Optimierungsproblem (LOP) integrieren. Es werden die

Beträge der $\Delta_{k,i}$ bewertet, welche sich ähnlich der Umformung von Beziehung (4.6) zu (4.7) nach

$$\Delta_{k,i} \geq s_{k,i-1} - 2 \cdot s_{k,i} + s_{k,i+1} \geq -\Delta_{k,i} \quad \forall k, 2 \leq i \leq N-1 \quad (4.10)$$

formulieren lassen.

Zur Einführung als Minimierungskriterium werden der Mittelwert und das Maximum der Beträge der zweiten Differenzen verwendet. Zur unterschiedlichen Gewichtung dienen die Faktoren Ω_{avg} und Ω_{max} als Parameter. Das führt zur Erweiterung des Minimierungskriteriums in Beziehung (4.9) um

$$\min \Omega_{max} \cdot \Delta_{k,max} + \frac{\Omega_{avg}}{N-2} \cdot \sum_{i=2}^{N-1} \Delta_{k,i} \quad (4.11)$$

mit $\Delta_{k,max} \geq \Delta_{k,i} \quad \forall k, 2 \leq i \leq N-1$.

Zum Vergleich mit der Spektralschätzung mit rang-beschränkter Pseudoinverse wurden in den erwähnten 100 Simulationsläufen auch jeweils Ergebnisse für die Methode der linearen Programmierung ermittelt. Die 100 ermittelten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen sind in Abbildung 4.3 im Vergleich zu den in der Simulation verwendeten Vorgabefunktionen (schwarz) dargestellt.

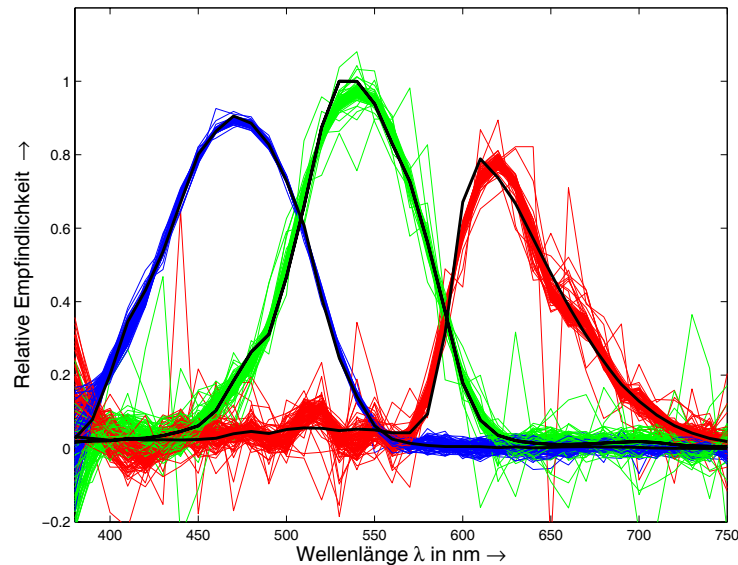


Abbildung 4.3: Schätzung der spektralen Empfindlichkeit mittels linearer Programmierung

Das Glattheitskriterium nach Beziehung (4.11) ließe sich in seiner Gewichtung noch verbessern. In der jetzigen Form sind die Gewichtungsfaktoren Ω_{avg} und Ω_{max} vom Wertebereich der gesuchten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen und diese wiederum vom Wertebereich der Matrixelemente in \mathbf{C} und \mathbf{r} abhängig. Dieses Problem lässt sich durch Normierung von \mathbf{C} und \mathbf{r} umgehen. Außerdem könnte unter Nutzung weiterer Vorkenntnisse über die gesuchten Spektralwertfunktio-

nen s die Mittelwertgewichtung durch $N - 2$ Gewichtungsfaktoren Ω_i für jedes der Δ_i ersetzt werden. Das hätte den Vorteil, dass die Spektralbereiche, in denen Krümmungen zu erwarten sind, bezüglich ihrer Glattheit geringer gewichtet werden.

Der visuelle Vergleich der Abbildungen 4.2(b) und 4.3 zeigt aber bereits, dass die SVD-Methode deutlich bessere Ergebnisse liefert. Deshalb werden die Verfahren mittels linearer Programmierung nicht weiter verfolgt, sondern die erweiterten Möglichkeiten in der quadratischen Optimierung untersucht.

4.2.3 Quadratische Optimierung

Als Erweiterung der linearen Optimierung bietet die quadratische Optimierung zusätzliche Möglichkeiten, z. B. die Produktbildung aus verschiedenen Komponenten (vgl. Kap. 3.5.4). Des Weiteren ermöglicht sie die quadratische Bewertung eines Fehlerkriteriums. Die Formulierung quadratischer Optimierungsprobleme vereint dadurch die Vorteile der linearen Optimierung und der Methode der kleinsten Quadrate.

Die Methode wurde beispielsweise von den Autoren in [BF02], [FHH98] oder [PHI⁺04] eingesetzt. Zunächst sollen auch hier die Kriterien des mittleren Fehlers nach Beziehung (4.4) und der Glattheit nach Beziehung (4.3) berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu den Ansätzen in der linearen Programmierung werden jetzt beide Kriterien quadratisch bewertet. Dies führt zu einer ausgewogenen Berücksichtigung aller δ_j und Δ_i , weil größere Abweichungen bei der Optimierung überproportional berücksichtigt werden. Dadurch kann das jeweils zusätzliche Kriterium des maximalen Fehlers entfallen.

Im ersten Ansatz wird entsprechend der Methode der kleinsten Fehlerquadrate der mittlere quadratische Fehler minimiert. Damit lautet die Zielfunktion

$$\min \frac{\omega}{O} \cdot \sum_{j=1}^O (r_{sim,k,j} - \mathbf{s}_{QP,k}^T \cdot \mathbf{c}_j)^2 \quad (4.12)$$

unter Berücksichtigung des mittleren absoluten quadratischen Fehlers für jede Farbprobe j und jeden Kanal k . Zur Bewertung der Glattheit der Spektralwertfunktion jedes Kanals k auf Basis des Quadrats der zweiten Differenzen wird das Minimierungskriterium mit

$$\min \frac{\Omega}{N-2} \cdot \sum_{i=2}^{N-1} (-\mathbf{s}_{QP,k,i-1} + 2 \cdot \mathbf{s}_{QP,k,i} - \mathbf{s}_{QP,k,i+1})^2 \quad (4.13)$$

erweitert. Die Glattheit wird wiederum für $N - 2$ spektrale Stützstellen i betrachtet.

Eine zusätzliche Nebenbedingung lässt sich durch die Minimierung der Randwerte jeder spektralen Empfindlichkeitsfunktion formulieren. Die Einführung dieses Kriteriums basiert auf der Überlegung, dass der zu schätzende Spektralbereich immer den gesamten Empfindlichkeitsbereich des Kamerakanals abdecken muss. Dies ist eine zwingende Voraussetzung des indirekten Messverfahrens. Folglich verläuft jede Empfindlichkeitsfunktion an der Grenze des Messbereichs gegen den

Wert Null. Durch Minimierung der Randwerte jeder Empfindlichkeitsfunktion nach

$$\min \frac{\nu}{2} \cdot (s_{QP,k,1}^2 + s_{QP,k,N}^2) \quad (4.14)$$

lässt sich dieses Kriterium mit dem Gewichtungsfaktor ν zur Eingrenzung der Spektralschätzung einsetzen.

Mithilfe der quadratischen Optimierung und den drei bislang genannten Kriterien wurden wiederum Schätzergebnisse für die 100 Simulationsläufe ermittelt. Die daraus resultierenden spektralen Empfindlichkeitsfunktionen s_{QP} sind in Abbildung 4.4(a) im Vergleich zu den in der Simulation verwendeten Vorgabefunktionen s dargestellt.

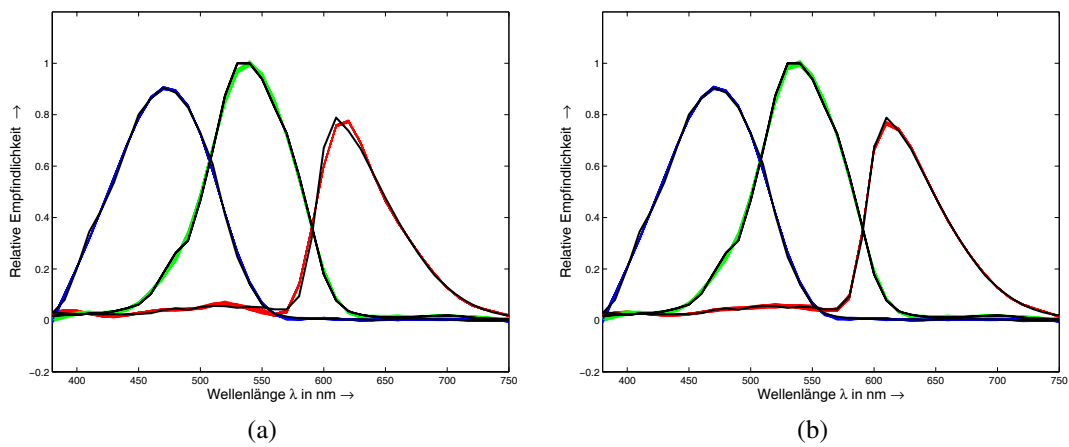


Abbildung 4.4: Schätzung der spektralen Empfindlichkeit mittels quadratischer Optimierung mit den Kriterien absoluter Fehler, Glattheit und Endwerte (a) und variabel gewichteter Glattheit (b)

Wie bereits im Kapitel der linearen Optimierung angedeutet, lässt sich die Güte des Schätzergebnisses weiter steigern, indem man das Glattheitskriterium mit $N - 2$ individuellen Gewichtungsfaktoren Ω_i für die spektralen Stützstellen jedes Sensorkanals k bewertet. Dadurch können die Spektralbereiche, in denen Krümmungen zu erwarten sind, bezüglich ihrer Glattheit geringer gewichtet werden. Das Minimierungskriterium nach Beziehung (4.13) ist entsprechend in

$$\min \sum_{i=2}^{N-1} \frac{\Omega_{k,i}}{N-2} \cdot (-s_{QP,k,i-1} + 2 \cdot s_{QP,k,i} - s_{QP,k,i+1})^2 \quad (4.15)$$

zu verändern. Die Gewichtungsfaktoren $\Omega_{k,i}$ lassen sich beispielsweise auf Basis der zweiten Differenzen für eine Empfindlichkeitsfunktion k berechnen. Da die zu schätzenden Funktionen in der Regel im Voraus nicht hinreichend bekannt sind, muss zunächst eine erste Schätzung mit den oben erwähnten Kriterien erfolgen und anschließend kann auf deren Basis eine Berechnung der $\Omega_{k,i}$ erfolgen, die zur Entspannung des Glattheitskriteriums an den Krümmungsstellen führt. Die Ergebnisse für die 100 Simulationsläufe sind in Abbildung 4.4(b) dargestellt.

Mit der Minimierung des relativen Fehlers δ_{rel} für jede Farbprobe j , gegeben durch

$$\delta_{rel,k,j}^2 = \left(\frac{\mathbf{s}_{QP,k}^T \cdot \mathbf{c}_j}{r_{sim,k,j}} - 1 \right)^2 \quad (4.16)$$

wird in [BF02] ein weiteres Kriterium vorgeschlagen. Die von Barnard beschriebenen Vorteile der Verringerung des Fehlers im rg-Koordinatensystem (vgl. Kap. 4.4.2) bei Verwendung des relativen Fehlerkriteriums können aber nicht bestätigt werden. Dieser Ansatz führt sogar zu einer Erhöhung der Unsicherheit in der Spektralschätzung, da die Farbproben, die eine geringe Sensoraussteuerung verursachen und somit ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis in der Reaktion aufweisen, stärker bewertet werden. Deshalb hat dieses Kriterium hier keine Verwendung gefunden.

4.2.4 Lagrangesche Multiplikatorenregel

Eine analytische Betrachtung des quadratischen Optimierungsproblems unter Nutzung der Lagrangeschen Multiplikatorenregel soll Aufschluss darüber geben, inwieweit die Zusatzinformation des Optimierungsalgorithmus in Form von Lagrange-Multiplikatoren nutzbar für eine Ergebnisbewertung ist. Die Lagrangesche Multiplikatorenregel ist ein Ansatz zur Analyse mehrdimensionaler Funktionen unter Nebenbedingungen, zu denen sich auch ein QOP zählen lässt. Die Methode dient der Suche nach den Extrema einer Funktion $f(x, y)$ mit der Nebenbedingung $g(x, y) = c$ (c - Konstante). Sie nutzt die Einführung neuer unbekannter skalarer Variablen L , den Lagrange-Multiplikatoren, um das Problem mit Nebenbedingungen in eines ohne Nebenbedingungen zu überführen. Dazu wird mit

$$F(x, y) = f(x, y) + \sum_j L_j \cdot g_j(x, y) \quad (4.17)$$

eine neue Funktion $F(x, y)$ durch Linearkombination der Nebenbedingungen mit den Multiplikatoren L als Koeffizienten gebildet. Dieses Problem lässt sich schließlich mit den üblichen Gradientenmethoden lösen.

Zur Analyse des QOP in Kapitel 4.2.3 soll dieses zunächst nur in seiner reduzierten Form

$$\min \sum_{j=1}^O \delta_j^2 \quad \text{mit } \delta_j = (r_{sim,k,j} - \mathbf{s}_{QP,k}^T \cdot \mathbf{c}_j) \quad (4.18)$$

unter der Nebenbedingung des mittleren absoluten quadratischen Fehlers betrachtet werden. Damit ist

$$F(\delta) = \sum_{j=1}^O \{ \delta_j^2 + L_j \cdot (r_{sim,k,j} - \mathbf{s}_{QP,k}^T \cdot \mathbf{c}_j - \delta_j) \} \quad (4.19)$$

die zu untersuchende Funktion. Die notwendige Bedingung für ein Extremum ist, dass die partiel-

len Ableitungen von $F(\delta)$ gleich Null sind. Aus

$$\frac{\partial F(\delta)}{\partial \delta_j} = 2 \cdot \delta_j - L_j = 0 \quad (4.20)$$

folgt, dass

$$L_j = 2 \cdot \delta_j = 2 \cdot (\mathbf{s}_k^T \cdot \mathbf{c}_j + \xi - \mathbf{s}_{QP,k}^T \cdot \mathbf{c}_j) \quad (4.21)$$

und unter Annahme einer idealen Schätzung ($\mathbf{s}_{QP,k} \equiv \mathbf{s}_k$) repräsentieren die zu einer Farbprobe j gehörigen Lagrange-Multiplikatoren mit

$$L_j \equiv 2 \cdot \xi_j \quad (4.22)$$

die Unsicherheit ξ der jeweiligen Kamerareaktion.

4.2.5 Diskussion

In diesem Kapitel wurden verschiedene mathematische Ansätze zur indirekten Bestimmung der spektralen Kameraempfindlichkeit beschrieben. Dazu wurden drei unterschiedliche Verfahren, basierend auf einer Invertierung des Gleichungssystems, auf der linearen und auf der quadratischen Optimierung, verwendet.

Anhand der vorgestellten Simulationsergebnisse ist zunächst eine qualitative Bewertung möglich, da die Simulation für alle Verfahren auf der gleichen Datenbasis durchgeführt wurde. Während die Verwendung der rang-beschränkten Pseudoinverse bereits eine gute Schätzung der spektralen Funktionen mit hoher Reproduzierbarkeit aufzeigt, sind die Ergebnisse mithilfe der linearen Programmierung auch nach mehrfacher Veränderung der verschiedenen Gewichtungsfaktoren als wesentlich schlechter einzustufen. Die lineare Programmierung zeigt Schwächen auf Grund ihres linearen Fehlerkriteriums und erweist sich als schwierig handhabbar in der Balance ihrer verschiedenen Gewichtungsfaktoren. Der Ansatz eines quadratischen Fehlerkriteriums zeigt hingegen wesentliche Vorteile, so dass die Gewichtungsfaktoren für die maximalen Abweichungen in der quadratischen Optimierung entfallen können. Das Ergebnis durch quadratische Optimierung weist zudem eine geringere Welligkeit gegenüber dem der rang-beschränkten Pseudoinversen auf.

Nach Erweiterung durch ein variabel gewichtetes Glattheitskriterium lässt sich die leichte Verschiebung des Rotkanal-Maximums, die auf Grund der Glättung oder auch bei Rang-Beschränkung auftritt, wesentlich verringern. Dieses Verfahren der Gewichtung erscheint allerdings als Widerspruch in sich, da somit das Glattheitskriterium ein weiteres Kriterium liefert, um sich selbst zu entschärfen. Diese Erweiterung erscheint nur dann anwendbar, wenn die zu schätzenden Originalfunktionen ausgeprägtere Krümmungen aufweisen als durch die Unsicherheit in den Kamerareaktionen und der optischen Messtechnik entstehen.

Zusammenfassend wird die quadratische Optimierung als das beste Werkzeug erachtet, da sie flexibel erweiterbar und damit zielführend einsetzbar ist (s. auch [BBS05]). Sie besitzt wesentliche Vorteile gegenüber der linearen Programmierung sowohl in der Fehlerbewertung, die sich auch

in einer einfacheren Aufstellung des Optimierungsproblems äußert, als auch durch Geschwindigkeitsvorteile in der Abarbeitung des Optimierungsalgorithmus.

In der Literatur sind noch einige weitere Optimierungskriterien genannt. Zu diesen zählen beispielsweise die Spektralschätzung durch Kombination von Basis-Funktionen, das Kriterium der Uni-Modalität der spektralen Funktion und die Forderung ausschließlich positiver Funktionswerte. Die genannten Kriterien kommen hier nicht zum Einsatz, da sie die Ergebnismenge zu stark einschränken würden.

Auf die Erkenntnisse aus der Analyse des QOP mittels Lagrangescher Multiplikatorenregel werden sich Teile des anschließenden Unterkapitels stützen. Deshalb soll an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen werden.

4.3 Methoden zur Farbfilterauswahl

Ein wesentliches Problem für die praktische Umsetzung der indirekten Messmethode stellt die Auswahl eines geeigneten Satzes von Farbproben dar. Ein solcher Satz sollte einen gegenüber der großen Menge verfügbarer spektral breitbandiger Farbfilter deutlich begrenzten Umfang besitzen, um den zeitlichen Aufwand für eine Messung gering zu halten. Die Aufgabe besteht folglich darin, aus dem umfangreichen Angebot eine im Sinne des Messverfahrens optimale Auswahl zu treffen. Dazu wird zunächst ein Kriterium zur Bewertung eines Farbprobensatzes benötigt.

4.3.1 Bewertungskriterium

Zur Bewertung der Eignung eines Farbprobensatzes zur Spektralschätzung ist die Definition eines Kriteriums erforderlich. In der Literatur ist oftmals eine Methode basierend auf der Singulärwertzerlegung (SVD, s. Kap. 4.2.1) anzutreffen (s. z. B. [DMT04]). Unter Betrachtung des Ansatzes in Beziehung (4.2) werden nur die Singulärwerte berücksichtigt, die oberhalb einer bestimmten Schwelle α bezogen auf den maximalen Singulärwert d_{11} liegen. Daraus leitet sich die Forderung an einen Farbprobensatz ab, nach der die Singulärwerte der Farbprobenmatrix ein möglichst geringes Gefälle aufzeigen sollten. Mit anderen Worten wird ein System aus zueinander orthogonalen Vektoren im spektralen Raum \mathbb{R}^N als optimal zur spektralen Charakterisierung erachtet. Danach stellt sich die klassische monochromatische Messmethode als bester Ansatz dar.

Diese Bewertungsmethode ist zunächst naheliegend und erscheint auch mit Blick auf die rangbeschränkte Pseudoinverse sehr sinnvoll. Aber da der Vorzug der monochromatischen Methode gegenüber indirekten Verfahren im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden soll, muss auch dieses Gütekriterium grundsätzlich in Frage gestellt werden. Einige einfache Tests zeigen auch sehr schnell Schwächen auf. Das nachstehende Beispiel soll dies kurz und anschaulich verdeutlichen. Es wird ein virtuelles Experiment durchgeführt, in dem das Bewertungskriterium auf einen Probensatz angewendet wird, welcher aus virtuellen Emissionsspektren besteht wie sie in guter Näherung von lichtemittierenden Dioden (LED) stammen könnten. Die Spektren folgen jeweils einer

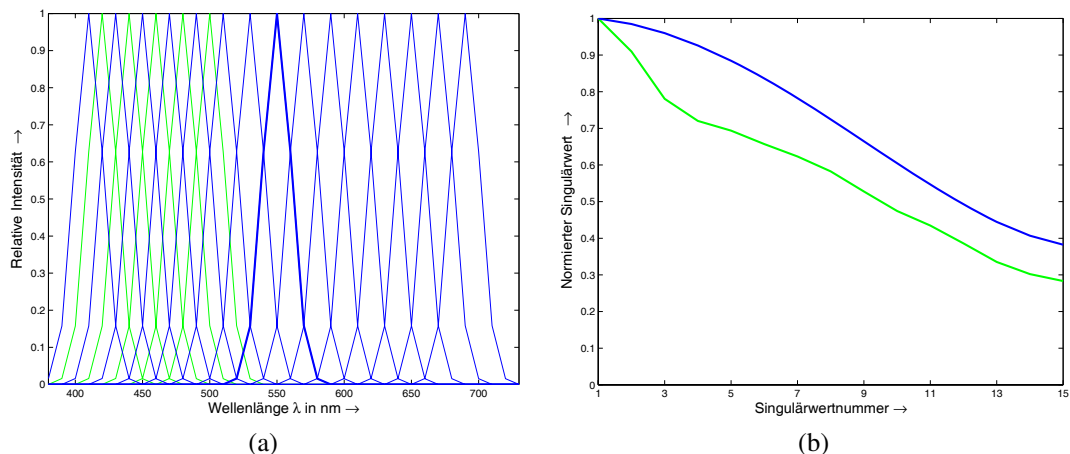


Abbildung 4.5: Test des Singulärwertkriteriums (b) anhand virtueller gaußförmiger Spektren (a)

gaußschen Verteilung mit einer Standardabweichung von $\sigma_\lambda = 10$ nm und variierender Mittenwellenlänge. Wendet man das Singulärwertkriterium auf eine Schar solcher Spektren mit Mittenwellenlängen von 410 nm bis 690 nm mit 20 nm Abstand an (in Abb. 4.5(a) blau gekennzeichnet), ergibt sich die ebenfalls blau dargestellte Singulärwertverteilung in Abbildung 4.5(b). Nimmt man nun willkürlich 5 weitere Spektren im kurzwelligen Bereich hinzu (grün in Abb. 4.5(a)) ergibt sich die in Abbildung 4.5(b) grün dargestellte Singulärwertverteilung. Obwohl aus messtechnischer Sicht eine Ergebnisverbesserung auf Grund der zusätzlichen Information zu erwarten wäre, fällt die Bewertung nach obigem Kriterium schlechter aus.

Im Folgenden wird das Kriterium zur Untersuchung verschiedener Farbprobensätze beziehungsweise derer Auswahlmethoden angewendet, aber stets mit kritischen Hinweisen auf dessen Aussagekraft.

4.3.2 Standardtestkarten

Eine typische Standardtestkarte zur farbmetrischen Kameracharakterisierung stellt der Macbeth ColorChecker (MCC) von Gretag-Macbeth dar. Dabei wird die Farbaufnahme der Kamera anhand der Kamerareaktionen auf die Testkarte unter Verwendung verschiedener Beleuchtungen beurteilt (vgl. Abb. 1.1). Die Zusammenstellung der Farbfelder erfolgte in einer Weise, dass sowohl Grautöne (Felder 19-24) als auch gesättigte Primär- und Sekundärfarben (Felder 13-18) und charakteristische Zwischentöne (Felder 1-12) berücksichtigt werden. In Abbildung 4.6 ist die Singulärwertverteilung für den MCC unter Annahme einer über die Wellenlänge konstanten Strahlungsverteilung (*equal-energy spectrum*) dargestellt.

Diese Standardtestkarte wurde auch mehrfach zur indirekten spektralen Kameracharakterisierung herangezogen (s. z. B. [PHI⁺04], [BF02], [Bar99], [FHH98]). Teilweise wurde zur Erhöhung der Gesamtmenge von Farbproben die Beleuchtung variiert (s. z. B. [BF02]). Da die Graufelder in

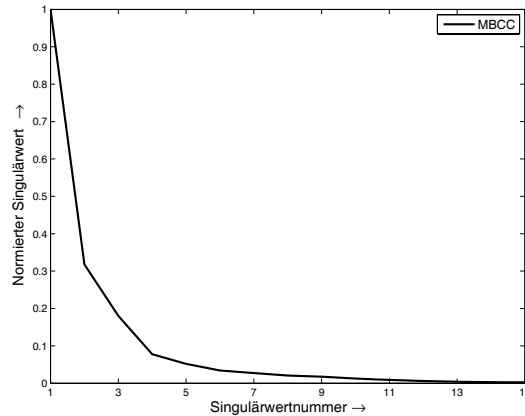


Abbildung 4.6: Das Singulärwertkriterium für den Macbeth ColorChecker unter Annahme einer konstanten Strahlungsverteilung

ihrer spektralen Charakteristik in erster Näherung linear abhängig sind, liefern diese kaum verwertbare Informationen für die spektrale Charakterisierung. Auch eine Variation der Beleuchtung erzeugt nur in sehr begrenzter Form zusätzliche Sicherheit in der spektralen Schätzung, da auch hier auf Grund der gleichbleibenden Objektspektren oftmals lineare Abhängigkeiten vorliegen. Deshalb wurde beispielsweise in [DMT04] eine relativ schlechte Eignung des Macbeth ColorCheckers für die spektrale Charakterisierung von Bildaufnehmern festgestellt.

4.3.3 Singulärwertmethode

In [HBS98] wird ein Verfahren zur gezielten Auswahl von optimal geeigneten Farbproben aus einer größeren Menge vorgestellt, welches hier als Singulärwertmethode bezeichnet wird. Der methodische Ansatz basiert ebenso wie das bereits erwähnte Bewertungskriterium auf dem inversen Verfahren nach Beziehung (4.2). Während mit der Methode in [HBS98] Reflektionsspektren selektiert wurden, lässt sie sich ebenso auf eine Farbprobenmatrix \mathbf{C} anwenden. Die Probenauswahl findet dann in nachfolgend beschriebener Weise statt.

Aus dem gesamten Farbprobensatz wird die Probe \mathbf{c}_{s1} als Startvektor gewählt, die die größte kartesische Norm im R^L aufweist. Für diese Probe gilt

$$\|\mathbf{c}_{s1}\| \geq \|\mathbf{c}_j\| \quad \forall j \quad (4.23)$$

und alle weiteren Proben können nun nach einer Strategie ermittelt werden, die immer die Probe \mathbf{c}_{sX} hinzunimmt, die ein maximales Verhältnis von kleinstem zu größtem Singulärwert der resultierenden Farbprobenmatrix $\mathbf{C}_{opt,X} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_{s1} & \cdots & \mathbf{c}_{sX} \end{bmatrix}$ erzeugt. Mit den Bezeichnungen $D_{min}(\mathbf{X})$ und $D_{max}(\mathbf{X})$ für die minimalen und maximalen Singulärwerte der Matrix \mathbf{X} lässt sich

das Auswahlkriterium für die zweite Probe \mathbf{c}_{s2} mit

$$\frac{D_{min} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{c}_{s1} & \mathbf{c}_{s2} \end{bmatrix} \right)}{D_{max} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{c}_{s1} & \mathbf{c}_{s2} \end{bmatrix} \right)} \geq \frac{D_{min} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{c}_{s1} & \mathbf{c}_j \end{bmatrix} \right)}{D_{max} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{c}_{s1} & \mathbf{c}_j \end{bmatrix} \right)} \quad \forall j \neq s1 \quad (4.24)$$

und für alle weiteren Proben mit

$$\frac{D_{min} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{c}_{s1} & \cdots & \mathbf{c}_{sX} \end{bmatrix} \right)}{D_{max} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{c}_{s1} & \cdots & \mathbf{c}_{sX} \end{bmatrix} \right)} \geq \frac{D_{min} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{c}_{s1} & \cdots & \mathbf{c}_{sX-1} & \mathbf{c}_j \end{bmatrix} \right)}{D_{max} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{c}_{s1} & \cdots & \mathbf{c}_{sX-1} & \mathbf{c}_j \end{bmatrix} \right)} \quad \forall j \neq \{s1, \dots, sX - 1\} \quad (4.25)$$

beschreiben. Damit erhält man einen optimalen Satz an Farbproben im Sinne des oben genannten Bewertungskriteriums und des Ansatzes der rang-beschränkten Pseudoinversen.

4.3.4 Lagrange-Multiplikator-Methode

Ein neuer Ansatz zur Auswahl eines optimalen Farbprobensatzes basiert auf der Auswertung der Lagrange-Multiplikatoren (vgl. Kap. 4.2.4). Diese Methode wurde bereits in [BBS05] und [BBS06] vorgestellt. Hinter dieser Methode verbirgt sich die Idee, dass ein Verfahren zur Auswahl optimaler Farbproben sowohl die Aufnahmebedingungen (Lichtquelle, Bildaufnehmer) als auch das Verfahren zur Schätzung der spektralen Empfindlichkeit des Bildaufnahmesystems berücksichtigen sollte. Deshalb wird die hier bevorzugte Methode der quadratischen Optimierung herangezogen, um auf Basis einer Simulation des Messvorhabens, wie in Kapitel beschrieben, einen optimalen Farbprobensatz zu ermitteln.

Als Basis dienen die Lagrange-Multiplikatoren, die hinsichtlich der Optimierungsrechnung Rückgabewerte des Algorithmus darstellen und die im Rahmen dieser Arbeit zur analytischen Betrachtung des QOP herangezogen wurden. Das Kriterium basiert auf dem Ansatz, dass sich eine Farbprobe als geeignet erweist, wenn sie bei jeglicher Unsicherheit in der Kamerareaktion im Mittel immer einen möglichst hohen Beitrag zur Eingrenzung des Schätzergebnisses leistet. Dieser Beitrag wird durch einen hohen dem absoluten Fehler δ_j jeder Farbprobe j zugeordneten Lagrange-Multiplikator (LM) repräsentiert. Die Ermittlung begründet sich schließlich auf einer statistischen Auswertung der LM für eine Vielzahl von Simulationsläufen mit jeweils neuen Unsicherheiten basierend auf dem erstellten Rauschmodell, wobei ein möglichst hoher absoluter Mittelwert des einer Farbprobe zugehörigen LMs gefordert wird.

In der mathematischen Beschreibung berechnet sich das Auswahlkriterium c für jede Farbprobe j nach

$$c_j = \sqrt{\sum_{k=1}^3 \left(\frac{1}{P} \cdot \sum_{p=1}^P L_{k,j,p} \right)^2} \quad (4.26)$$

durch Mittelung über eine Anzahl von P Simulationsläufen und geometrische Addition der Ergebnisse für die drei Farbkanäle k . Nach diesem Kriterium ist eine Farbprobe j umso besser für das

Verfahren geeignet, je größer ihr Wert c_j ausfällt. In Abbildung 4.7(a) sind die Singulärwertverteilungen für die 60 ausgewählten Farbproben und für den zur Verfügung stehenden Gesamtsatz von 196 Farbproben gegenübergestellt. Es lässt sich feststellen, dass die Reduzierung des Probensatzes keine Verschlechterung im Sinne dieses Bewertungskriteriums zur Folge hat. Bei der Bewertung wurde die Strahlungsverteilung der für den Messaufbau vorgesehenen gefilterten Lichtquelle berücksichtigt.

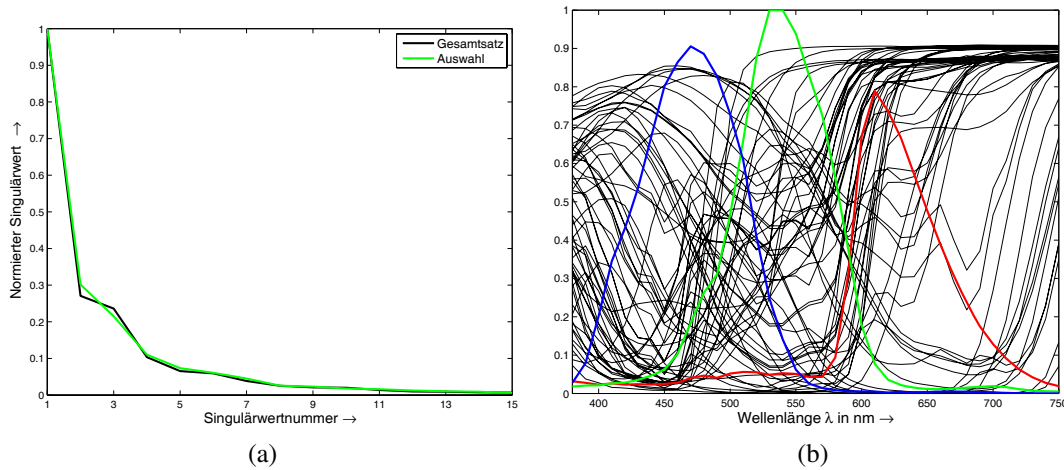


Abbildung 4.7: Das Singulärwertkriterium (a) für die nach Lagrange-Multiplikator-Methode ausgewählten Roscolux-Filter (b) im Vergleich zum Gesamtsatz

Die Transmission der ausgewählten Roscolux-Filter ist in Abbildung 4.7(b) den zu ermittelnden spektralen Empfindlichkeitsfunktionen gegenübergestellt. Die gezeigte Auswahl basiert auf der quadratischen Optimierung unter Verwendung der Kriterien in Beziehung (4.12) bis (4.14). Dabei zeigt sich eine Tendenz zur Auswahl solcher Filterfolien, deren Transmission in dem Spektralbereich einen steilen Anstieg aufweisen, in dem die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen eine starke Krümmung besitzen (charakteristisch ist beispielsweise der Bereich um 600 nm). Diese Tendenz lässt sich durch Betrachtung des Analyseergebnisses der QOP in Kapitel 4.2.4 bestätigen. Beziehung (4.22) beruhte auf der Annahme, dass ein ideales Schätzergebnis erzielt wird. In Kapitel 4.2.3 hat sich hingegen gezeigt, dass das Glattheitskriterium auch für eine Glättung der Krümmungsstellen der Empfindlichkeitsfunktionen sorgt (vgl. Abb. 4.4(a)). Die an den Krümmungsstellen entstehenden Abweichungen zwischen der geschätzten Empfindlichkeitsfunktion s_{QP} und der tatsächlichen s sorgen für eine deutliche Differenz bei gerade den Farbproben, die an dieser Stelle eine starke Veränderung im Spektrum aufweisen. Folglich erhält deren zugehöriger Lagrange-Multiplikator L_j nach Beziehung (4.21) neben der Unsicherheit ξ einen konstanten Fehler in δ_j . Dieser konstante Fehler führt wiederum zur Auswahl dieser Farbprobe nach dem Kriterium in Beziehung (4.26).

4.3.5 Diskussion

Es wird zur Diskussion gestellt, dass sich ein optimal geeigneter Farbprobensatz an den Messgegebenheiten und der Messmethode orientieren muss. Daher wurde von dem allgemeinen mathematischen Ansatz, einen Satz zueinander orthogonaler Vektoren zu ermitteln, abgewichen und eine Methode basierend auf der eingesetzten Optimierungsalgorithmik entwickelt.

Das Bewertungskriterium der Singulärwertverteilung beurteilt breitbandige spektrale Strahlungsverteilungen grundsätzlich als ungeeignet. Daher kann basierend auf diesem Kriterium keine Gütebewertung von Methoden zur Farbfilterauswahl durchgeführt werden. Da sich kein unabhängiges Kriterium zur Bewertung der Eignung eines ausgewählten Farbprobensatzes aufstellen lässt, kann schließlich nur die gesamte Messmethode zur Bestimmung der spektralen Kameraempfindlichkeit einer Bewertung unterzogen werden. Dabei wird die Zielstellung verfolgt, auf Basis von ermittelten Empfindlichkeitsfunktionen die Kamerareaktionen auf einen unabhängigen Testprobensatz möglichst gut vorhersagen zu können. Im nachfolgenden Kapitel werden Verfahren zu diesem Zweck beschrieben.

4.4 Verfahren zur Bewertung der Messergebnisse

Zur Bewertung der Ergebnisse einer Messung der spektralen Empfindlichkeit eines Bildaufnahmesystems werden weitere Bewertungskriterien benötigt. Diese sollen sowohl zur Beurteilung der klassischen direkten Messmethode als auch der indirekten Schätzmethode dienen.

Typische Bewertungsverfahren beurteilen ein Messergebnis im Vergleich zu einer Referenz. Dabei wird beispielsweise die Differenz zwischen Messung und Referenz ermittelt und auf den maximalen Referenzwert normiert. Ein solcher Ansatz erfordert die Möglichkeit, eine eindeutige Referenz zu bestimmen. Da die Ergebnisse der direkten und der indirekten Messmethode gegenübergestellt werden sollen, kann keine der beiden als Referenz dienen. Deshalb ist eine unabhängige Vergleichsbetrachtung erforderlich.

Das ideale Kriterium im Sinne der weiteren Verwendung der Ergebnisse stellt ein Vergleich zwischen realen und berechneten Kamerareaktionen dar, wobei die Berechnung auf der gemessenen beziehungsweise der aus einer Messung geschätzten spektralen Empfindlichkeit basiert. Ein solches Kriterium bewertet die Güte einer modellbasierten Vorhersage von Kamerareaktionen, welche schließlich zur anwendungsspezifischen Parametrierung von Farbkorrektur- und Farbkonstanzalgorithmen eingesetzt werden sollen (s. Kap. 6). Zur objektiven Gütebewertung ist die Verwendung eines vom Messfarbprobensatz C_{opt} unabhängigen Testfarbprobensatzes C_{test} erforderlich. Mögliche Bewertungskriterien werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt.

4.4.1 Normierte Farbvektordifferenz

Das Kriterium der normierten Farbvektordifferenz wurde bereits in [BBS05] und [BBS06] veröffentlicht. Es dient der direkten Bewertung des Messergebnisses auf Basis der gesamten mehrkana-

ligen Kamerareaktion. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zu den vorgestellten Optimierungsverfahren, welche grundsätzlich jeden spektralen Bildaufnahmekanal getrennt charakterisieren. Das Abstandsmaß wird für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten RGB-Bildsensoren eingesetzt. Es lässt sich aber auch auf Systeme mit mehr als drei Aufnahmekanälen übertragen.

Es wird der Abstand zwischen der tatsächlichen und der vorhergesagten Kamerareaktion im Farbraum des Bildaufnahmesystems bewertet. Um eine Unabhängigkeit von der Zahlendarstellung und Aussteuerung des Bildaufnehmers zu erlangen, wird der vektorielle Abstand der beiden Kamerareaktionen auf die Länge eines Referenzvektors normiert, der durch die Kamerareaktion auf das Spektrum der verwendeten Lichtquelle entsteht. Dieses Abstandsmaß soll als normierte Farbvektordifferenz e_{RGB} bezeichnet werden und berechnet sich nach

$$e_{RGB,j} = \frac{\|\mathbf{r}_j - \mathbf{s}^T \cdot \mathbf{c}_{test,j}\|}{\|\mathbf{r}_{ref}\|} \quad (4.27)$$

mit den Kamerareaktionen \mathbf{r} auf den Testfarbprobensatz \mathbf{C}_{test} und der in einer direkten oder indirekten Messung bestimmten spektralen Empfindlichkeit \mathbf{s} . Das Abstandsmaß kann für jede Testfarbprobe erfasst und berechnet werden. Das Gesamtergebnis kann durch den Mittel- und den Maximalwert der normierten Farbvektordifferenz charakterisiert werden.

4.4.2 Chromatischer Abstand

Neben der normierten Farbvektordifferenz wird der Abstand der jeweiligen Farborte, der chromatische Abstand, als Maß für die Güte der spektralen Empfindlichkeitsmessung herangezogen (s. auch [BBS05], [BBS06]). Der zu einer Reaktion $\mathbf{r} = \begin{bmatrix} R & G & B \end{bmatrix}^T$ im RGB-Farbraum des Bildaufnahmesystems gehörige Farbort wird durch die chromatischen Koordinaten

$$r = \frac{R}{R + G + B} \quad \text{und} \quad g = \frac{G}{R + G + B} \quad (4.28)$$

in einem rg -Diagramm spezifiziert (vgl. Normfarbwertanteile, Bez. (2.5)). Die chromatischen Koordinaten rg , auch Farbwertanteile genannt, besitzen auf Grund der Helligkeitsnormierung die Eigenschaft $r + g + b = 1$ und ermöglichen somit eine zweidimensionale Darstellung von Farborten ohne Berücksichtigung der Helligkeit. Diese Definition erfolgt in Analogie zu den Normfarbwertanteilen xy (chromatische Koordinaten), welche von der CIE definiert wurden (s. z. B. [WS82], [Ric76]).

Der chromatische Abstand e_{rg} berechnet sich schließlich nach

$$e_{rg,j} = \sqrt{\left(\frac{R_j}{\sum \mathbf{r}_j} - \frac{\mathbf{s}_R^T \cdot \mathbf{c}_j}{\sum \mathbf{s}^T \cdot \mathbf{c}_j} \right)^2 + \left(\frac{G_j}{\sum \mathbf{r}_j} - \frac{\mathbf{s}_G^T \cdot \mathbf{c}_j}{\sum \mathbf{s}^T \cdot \mathbf{c}_j} \right)^2} \quad (4.29)$$

als geometrischer Abstand im rg -Diagramm.

4.4.3 Farbabstandsformeln

Die bisher vorgestellten Ansätze sorgen für eine direkte Bewertung der Charakterisierung des Bildaufnahmesystems. Sie beurteilen allein die Messmethode und ihr Ergebnis. Sie lassen aber keine direkten Aussagen über die Qualität der gerätespezifischen Farbbewertung mit Hinsicht auf das menschliche Sehsystem (HVS) zu. Eine Gütebewertung im Sinne des HVS kann basierend auf den in Kapitel 3.4.3 beschriebenen Farbabstandsformeln erfolgen.

4.4.4 Diskussion

Typische Bewertungsverfahren beurteilen ein Messergebnis im Vergleich zu einer Referenz. Dabei wird beispielsweise die Differenz zwischen Messung und Referenz ermittelt und auf den maximalen Referenzwert normiert. Ein solcher Ansatz erfordert die Möglichkeit, eine eindeutige Referenz zu bestimmen. Da diese für die spektrale Charakterisierung nicht direkt vorliegt, werden Verfahren benötigt, die eine Gegenüberstellung der zwei Messmethoden ermöglichen. Der Ansatz besteht in einem Vergleich von realen und vorhergesagten Kamerareaktionen mit Bezug auf einen unabhängigen Testprobensatz (s. Kap. 5.4).

Dabei sollte die Gütebewertung direkt im AufnahmeFarbraum stattfinden, um eine ausschließlich auf die spektrale Charakterisierung des Aufnahmesystems bezogene Beurteilung durchzuführen. Zu diesem Zweck wurden zwei Gütekriterien vorgestellt. Während die normierte Farbvektordifferenz den Farbabstand im dreidimensionalen AufnahmeFarbraum bewertet, wird mit dem chromatischen Abstand die Abweichung der Farborte beurteilt. Die dreidimensionale Betrachtung erweist sich als sinnvoll, um eine Gesamtbewertung für die Vorhersage einer Kamerareaktion zu erstellen. Die Betrachtung des Farborts stellt einen geeigneten Ansatz mit Bezug auf die Parametrierung von Farbkorrektur- und Farbkonstanzalgorithmen dar, da diese Algorithmen oftmals auf eine Bewertung von Farbkoordinaten aufsetzen (s. z. B. [BCF02], [FS01]).

In vielen Fällen erscheinen Farbabstandsformeln als geeignetes Mittel für eine Gütebewertung, da sie auf das menschliche Sehsystem bezogen sind und eine weite Verbreitung aufweisen, so dass viele Anwender einen schnellen Zugang zu dieser Art der Bewertung finden. Diese Verfahren besitzen allerdings den Nachteil, dass sie stärker die Transformierbarkeit der spektralen Empfindlichkeitsfunktionen zu den Normspektralwertfunktionen beurteilen als das Ergebnis der Spektralmessung. Deshalb wird die spektrale Charakterisierung des Bildaufnahmesystems zunächst isoliert als physikalisches Problem betrachtet und später werden im Zuge der Entwicklung und Parametrierung von Farbkorrektur-Transformationen die Farbabstandsformeln zum Einsatz kommen, um die Farbbildreproduktion im Sinne des menschlichen Sehsystems zu bewerten.

5 Messung der spektralen Kameraempfindlichkeit

In diesem Kapitel erfolgt die Anwendung der im vorhergehenden Kapitel untersuchten Methoden zur indirekten Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit eines Bildaufnahmesystems. Es wird der messtechnische Aufbau erläutert und die gewonnenen Ergebnisse präsentiert. Zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit wird die quadratische Optimierung zum Einsatz kommen. Zum Vergleich werden direkte Spektralmessungen auf Basis der in [Krü04] vorgestellten Spektrometernmethode durchgeführt. Die Güte der jeweiligen Ergebnisse wird unter Verwendung eines Testprobensatzes und den im vorhergehenden Kapitel vorgestellten Kriterien beurteilt.

Vor den Messungen der spektralen Empfindlichkeit erfolgt eine Charakterisierung des Bildaufnahmesystems der Kamera hinsichtlich seines Pixel-Übertragungsverhaltens. Darunter wird an dieser Stelle die Übertragungskennlinie von einem optischen Eingangssignal zu einem digitalen Ausgangssignal verstanden. Die Bestimmung und Korrektur ist eine wichtige Voraussetzung für die Messung der spektralen Empfindlichkeit.

Abschließend werden die Ergebnisse bewertet und die Eignung der Verfahren unter Berücksichtigung des notwendigen Aufwands beurteilt. Desweiteren werden die Voraussetzungen für eine optimale Parametrierung der Farbkorrektur-Algorithmen für die Kamera geprüft.

5.1 Bestimmung des Pixel-Übertragungsverhaltens

Die Charakterisierung des Pixel-Übertragungsverhaltens ist eine entscheidende Grundlage für die Spektralschätzung, da diese auf einem linearen Kameramodell (vgl. Bez. (4.1)) basiert. Das Übertragungsverhalten eines Bildaufnahmesystems wird durch eine Kennlinie \mathcal{F} charakterisiert, die den Zusammenhang zwischen einer vom Bildsensor aufgenommenen Strahlungsenergie und dem digitalisierten Grauwert beschreibt. Dieser Zusammenhang kann auch für CCD-Sensoren nur in erster Näherung als linear angenommen werden.

In Kapitel 2.3.3 wurde bereits erwähnt, dass die untersuchten Kameras eine geringfügige Nichtlinearität von etwa 2% aufweisen. Während eine Nichtlinearität in dieser Größenordnung in Bild-daten visuell nicht erkennbar ist, ist deren Korrektur für messtechnische Untersuchungen wie die Schätzung der spektralen Empfindlichkeit auf Basis breitbandiger Proben eine wichtige Voraussetzung. Deshalb soll hier die Messmethode und deren Ergebnisse kurz erläutert werden.

Es soll an dieser Stelle angemerkt werden, dass hier durch den direkten Zugriff auf die digitalisierten Sensordaten eine präzise Messbarkeit der Übertragungskennlinie ermöglicht wird. Da-

durch kann die spektrale Charakterisierung auf das in Kapitel 2 vorgestellte Bildaufnahmesystem bezogen werden, ohne eine nachgeschaltete digitale Signalverarbeitung berücksichtigen zu müssen. Dieser Ansatz unterscheidet sich grundsätzlich von denen in [VFTB97a], [Bar99], [Kön01] und [CWT04] und bietet hier wesentliche Vorteile für die Charakterisierung und Korrektur der Nichtlinearität und damit auch für die Spektralschätzung.

In dieser Arbeit kommt ein Messverfahren basierend auf der Variation der Integrationszeit des Bildaufnahmesystems zum Einsatz, welches beispielsweise in [Krü04] beschrieben wird. Dazu werden Bilddaten bei unterschiedlichen Integrationszeiten und konstanter Bestrahlungsstärke gewonnen. Die Veränderung der Integrationszeit unter Nutzung des elektronischen Shutters (s. Kap. 2.2.2) kann als Variation der aufgenommenen Strahlungsenergie aufgefasst werden. Die Kamera-reaktion r wird als mittlerer Grauwert aus den Bilddaten bestimmt. Damit ergibt sich die Übertragungskennlinie durch den Grauwert als Funktion der Integrationszeit t_{INT} . Diese ist in Abbildung 5.1(a) im Vergleich zur Regressionsgerade dargestellt.

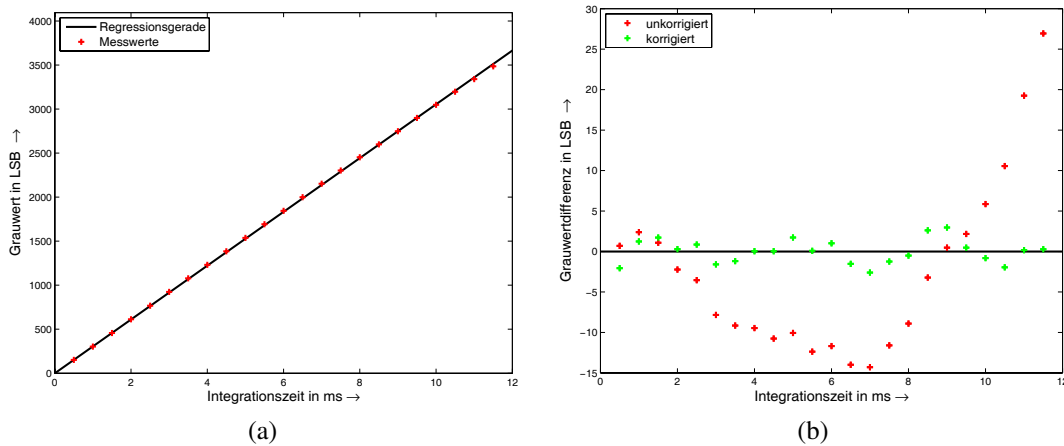


Abbildung 5.1: Die Übertragungskennlinie (a) und die integrale Nichtlinearität (b) für eine Kamera vom Typ Kappa DXc100

Nach Beziehung (2.24) ergibt sich eine Nichtlinearität von $NL = 1,18 \%$ für diese Übertragungskennlinie. Eine bessere Betrachtung der Abweichung erlaubt die in Abbildung 5.1(b) dargestellte integrale Nichtlinearität (INL) als Differenz zwischen der Regressionsgeraden und der Übertragungskennlinie.

Zur funktionalen Charakterisierung der Kennlinie \mathcal{F} (vgl. Bez. (2.25)) wird mit

$$r = \mathcal{F}(t_{INT}) = \sum_{m=1}^3 b_m \cdot t_{INT}^m \quad (5.1)$$

eine Polynomfunktion dritter Ordnung an die Kamerareaktionen r angepasst (*fitting*). Die dritte Ordnung ist erforderlich, um die s-förmige Kennlinie möglichst gut zu approximieren. In der Anwendung der Algorithmen zur Spektralschätzung hat sich gezeigt, dass sich die Abweichungen der Schätzergebnisse verringern, wenn vorher eine Linearisierung der Kameradaten durchgeführt

wird. Die Korrektur der Kamerareaktionen r erfolgt schließlich durch Anwendung der Umkehrfunktion \mathcal{F}^{-1} . Das Ergebnis der Korrektur ist in Abbildung 5.1(b) gezeigt. Nach Anwendung der Umkehrfunktion verbleibt eine Nichtlinearität von $NL = 0,16\%$.

5.2 Indirekte Messmethode

Die indirekte Spektralmessung mithilfe breitbandiger Farbproben basiert auf den in Kapitel 4 vorgestellten Methoden. Zunächst wird der zur praktischen Umsetzung konzipierte Farbkameramessplatz präsentiert und erläutert. Anschließend werden die erzielten Messergebnisse unter Anwendung der quadratischen Optimierungsmethode vorgestellt. Dabei werden die unterschiedlichen Resultate für korrigierte und unkorrigierte Kamerareaktionen untersucht.

5.2.1 Farbkameramessplatz

Die in Kapitel 4 vorgestellten Methoden zur indirekten Spektralschätzung erfordern einen präzisen und stabilen optischen Aufbau zur reproduzierbaren Erfassung der Farbprobenspektren und der entsprechenden Kamerareaktionen. Mit der Zielstellung einer einfach handhabbaren Messprozedur, die bei geringem Kalibrieraufwand reproduzierbare Ergebnisse liefert, wurde der spezielle, in Abbildung 5.2 dargestellte Farbkameramessplatz entwickelt und angefertigt. Der Messplatz zeichnet sich durch seine kompakte Bauform und präzise Führungen für verschiedene Träger von optischen Bauelementen aus, und erlaubt eine schnelle Montage verschiedener Kameras zur messtechnischen Untersuchung.

Der Farbkameramessplatz besteht im Wesentlichen aus einer stabilen Wolfram-Halogen-Lichtquelle, verschiedenen Filtern zur Modifikation der spektralen Strahlungsverteilung der Lichtquelle, einem schrittmotorgetriebenen Filterrad zur Aufnahme der ausgewählten Filterfolien und einem Strahlteiler, der die gleichzeitige spektrale Referenzmessung und Aufnahme der Kamerabildaten ermöglicht. Vor der Verwendung des Messplatzes müssen alle spektral wirkenden Komponenten, vor allem der Strahlteiler, spektral charakterisiert werden. Anschließend kann mit den oben beschriebenen Methoden die Spektralschätzung für jede Kamera durchgeführt werden. Zur detaillierteren Betrachtung ist der Messaufbau in Abbildung 5.3 schematisch dargestellt.

Zur spektralen Referenzmessung wurde in dieser Arbeit ein Spektrometer des Typs USB2000 von der Firma Ocean Optics Inc. (OOI) eingesetzt. Das Spektrometer zeichnet sich durch seine kompakte Bauweise und einfache Handhabung aus. Die Kompaktheit erhält der optische Aufbau durch die Umsetzung einer gefalteten Czerny-Turner-Anordnung. Die spektrale Auflösung wird vom Hersteller mit $\Delta\lambda \approx 1,33\text{ nm}$ (FWHM¹) angegeben. Zur eindimensional orts aufgelösten Strahlungserfassung kommt ein CCD-Zeilensensor vom Typ ILX511 der Firma Sony zum Einsatz [Son98]. Somit findet bereits bei der Messdatenerfassung eine spektrale Diskretisierung statt. Die Abtastung eines Spektrums erfolgt mit etwa 0,35 nm pro Pixel des Zeilensensors. Zur

¹FWHM - Full Width at Half Maximum

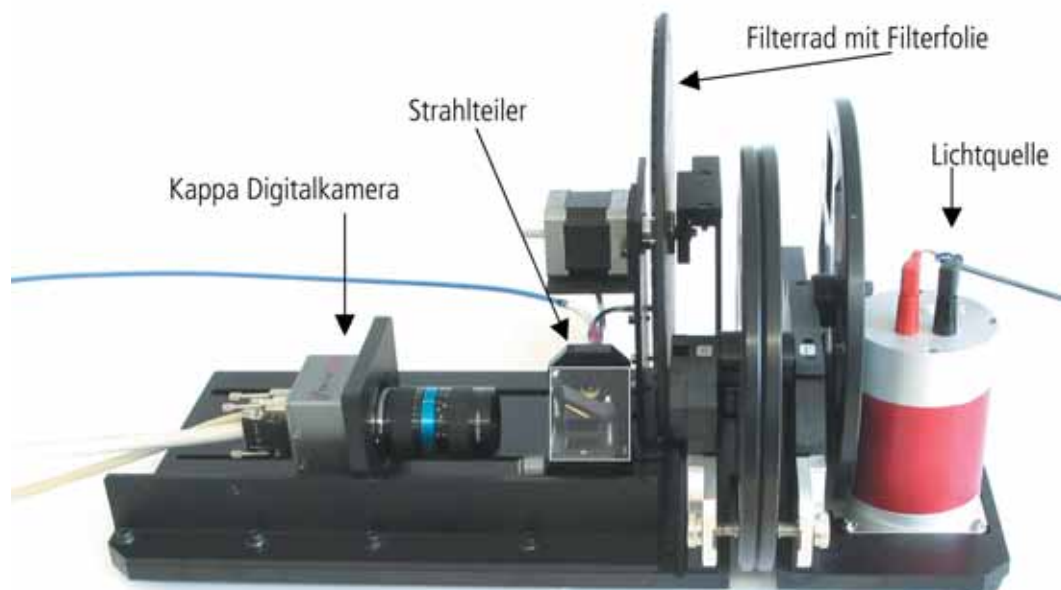


Abbildung 5.2: Farbkameramessplatz

weiteren Verwendung der Messdaten wird daraus ein spektraler Auszug im Bereich $\lambda_1 = 380 \text{ nm}$ bis $\lambda_2 = 750 \text{ nm}$ mit einem Stützstellenabstand von $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$ extrahiert.

Mithilfe einer stabilisierten Lichtquelle (Typ HL-2000 von OOI, [Oce03]) kann das Spektrometer inklusive der zusätzlichen optischen Komponenten wie dem verwendeten Lichtwellenleiter (s. Abb. 5.2: blau im Hintergrund) für die radiometrische Messung spektraler Strahlungsverteilungen kalibriert werden. In Abbildung 5.4(a) ist das Messergebnis für die am Farbkameramessplatz eingesetzte Lichtquelle BN-9701 von der Firma Gigahertz Optik dargestellt. Diese Lichtquelle wird vom Hersteller auch als kalibrierte Lichtquelle für die Normlichtart A (vgl. Abb. 5.4) angeboten (s. [Gig98]). Das direkte Strahlungsspektrum der Lichtquelle ist für das angestrebte indirekte Messverfahren ungeeignet, da die Strahlungsverteilung sehr ungleichmäßig über den Messbereich verteilt ist. Deshalb ist der Messplatz mit zusätzlichen optischen Filtern zur spektralen Anpassung der Lichtquelle ausgestattet. Dazu sind auf einem Filterrad Absorptionsgläser des Typs BG34 von SCHOTT in unterschiedlichen Dicken montiert. Die Verwendung eines 2 mm dicken BG34 Filters führt zu dem in Abbildung 5.4(a) schwarz dargestellten Strahlungsspektrum. Dieses weist zwar noch einen deutlichen Abfall der Strahlungsleistung bei Wellenlängen unterhalb von 400 nm auf, aber diese kleine Einschränkung wird durch eine hohe zeitliche Stabilität der Lichtquelle ausgeglichen (s. [BBB06]). Damit sind die Eigenschaften der Strahlungserzeugung insgesamt als hinreichend geeignet für das angestrebte Messverfahren einzustufen.

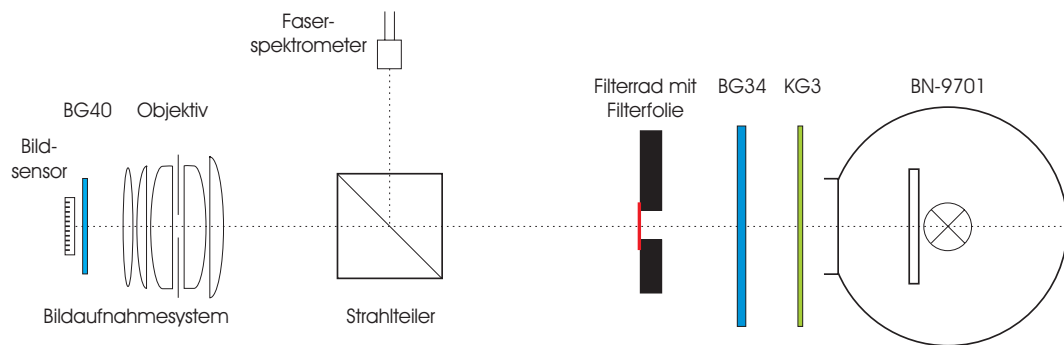


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung des Farbkameramessplatz

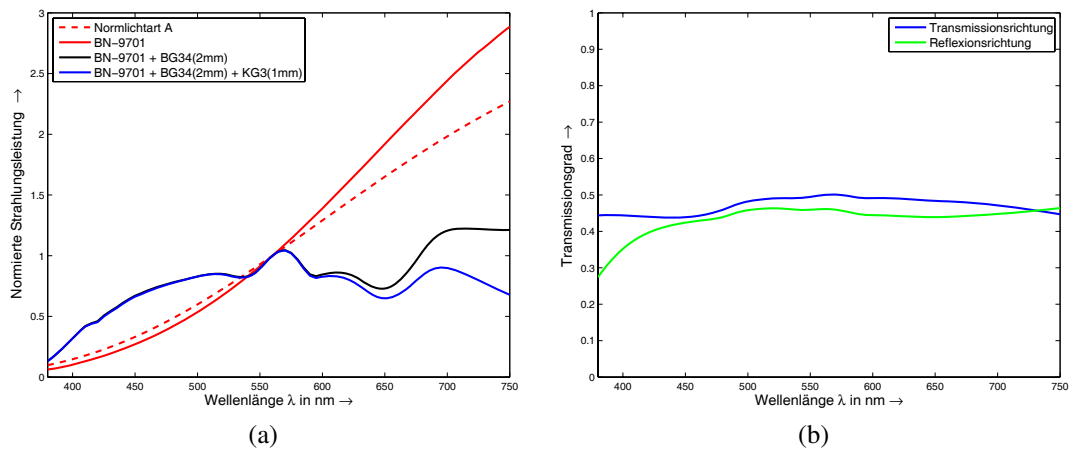


Abbildung 5.4: Normierte spektrale Strahlungsverteilung verschiedener Lichtquellen (a) und Transmission des Strahlteilerwürfels (b)

Ein 50/50 Strahlteilerwürfel ermöglicht zeitgleich die Bildaufnahme mit der Kamera und eine spektrale Referenzmessung. Die gleichmäßige Aufteilung der Strahlung in den transmittierenden und den reflektierenden Zweig lässt sich bestenfalls integral über den VIS-Bereich erreichen. Eine spektral aufgelöste Betrachtung ergibt die in Abbildung 5.4(b) dargestellten Transmissionsfunktionen $\tau_r(\lambda)$ (grün) und $\tau_t(\lambda)$ (blau) für die beiden Zweige. Diese sind korrigierend zu berücksichtigen, wenn aus der spektralen Referenzmessung die Farbprobenmatrix C berechnet wird. Das Herzstück des Messaufbaus besteht in dem bereits erwähnten schrittmotorgetriebenen Filterrad. Das Filterrad verfügt über insgesamt 61 Messpositionen. Davon dienen 60 Positionen zur Aufnahme von Filterfolien und eine verbleibt zur Referenzmessung des Lichtquellenspektrums. Zur Auswahl der Filterfolien wird das in Kapitel 4.3.4 beschriebene Verfahren verwendet. Der damit ermittelte Probensatz wird zur indirekten Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit auf dem Filterrad montiert. Das Filterrad ist in Abbildung 5.5(a) in einer Aufsicht dargestellt. Aus der Sicht der Kamera ergibt sich das in Abbildung 5.5(b) gezeigte Bild. Dabei ist anzumerken, dass nur ein Bildausschnitt (AOI, siehe Koordinatenachsen) abgebildet ist.

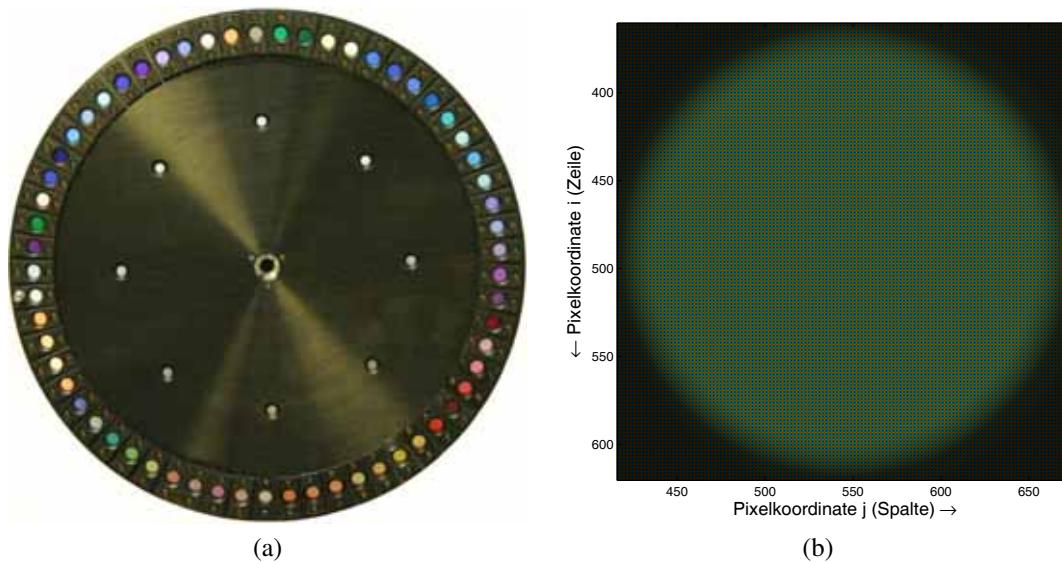


Abbildung 5.5: Das Filterrad (a) und eine Filterposition aus Sicht der Kamera (b)

5.2.2 Ergebnisse

Es wurden die spektralen Strahlungsverteilungen der Lichtquelle (Referenzspektrum) und der durch die ausgewählten Filterfolien erzeugten Farbprobenspektren mit oben genanntem Spektrometer erfasst. In Abbildung 5.6(a) sind das Referenzspektrum (blau) und die 60 Farbprobenspektren (schwarz) dargestellt. Die spektrale Verfälschung durch den Strahlteilerwürfel wurde korrigiert. Alle Spektren sind auf das Maximum des Referenzspektrums normiert und werden in dieser Form numerisch in der Farbprobenmatrix C abgelegt.

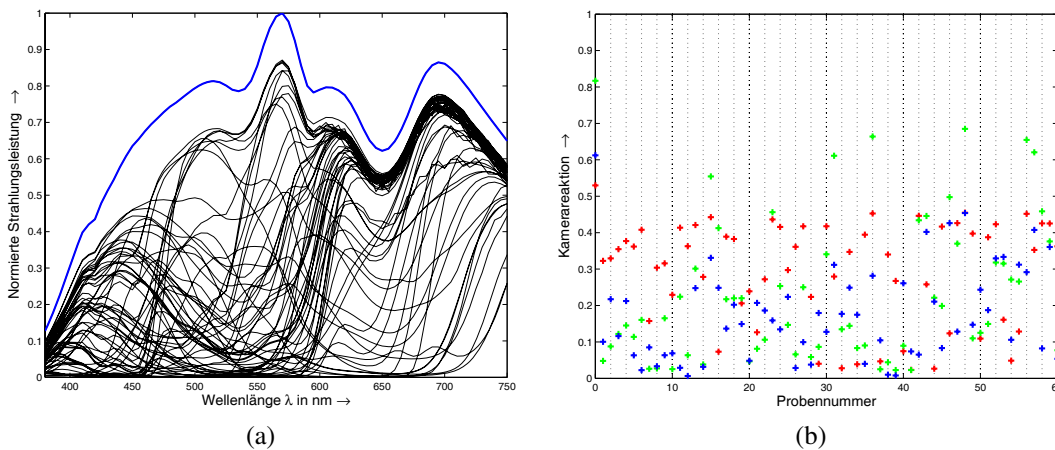


Abbildung 5.6: Die spektrale Verteilung der Farbprobenauswahl (a) und die darauf basierenden Kamerareaktionen der Kappa DXc100 (b)

Gleichzeitig wurden die Reaktionen einer Kamera vom Typ Kappa DXc100 auf die gezeigten 61 Farbprobenspektren erfasst. Dabei wurde der Mittelwert in jedem Farbkanal in einem AOI der

Größe 25×25 Pixel für jede Farbprobe gebildet. Die damit gewonnene Kamerareaktionsmatrix \mathbf{r} ist in Abbildung 5.6(b) veranschaulicht. Es ist zu erkennen, dass trotz der Anpassung des Lichtquellenspektrums (vgl. Abb. 5.4(a)) der Blaukanal im Mittel am geringsten angesteuert ist. Der Idealfall wäre aus messtechnischer Sicht eine im Mittel gleichmäßige Aussteuerung der Farbkanäle, um jeweils ein optimales Signal-Rausch-Verhältnis zu erreichen.

Die spektrale Empfindlichkeit dieses Bildaufnahmesystems wird schließlich unter Verwendung der quadratischen Optimierung und den Kriterien nach Beziehung (4.12) bis (4.14) auf Basis von \mathbf{C} und \mathbf{r} geschätzt. Durch Variation der Gewichtungsfaktoren ω , Ω und ν in Reihenuntersuchungen haben sich die Gewichtungsfaktoren

$$\omega = 1; \quad \Omega = 0,05; \quad \nu = 0,005 \quad (5.2)$$

als geeignet erwiesen. Nach diesem Verfahren ergeben sich die in 5.7 dargestellten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen. Im Vergleich zu diesen indirekt bestimmten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen sind die nach Datenblättern als typisch angegebenen Werte gezeigt. Dabei wurde die Empfindlichkeit des Bildsensors aus dem Datenblatt [Eas07] und die Transmission des BG40-Filters zur spektralen Anpassung aus dem SCHOTT Kalkulationsprogramm [SCH04] entnommen. Die Transmission des verwendeten Messobjektivs vom Typ Lametar 2.8/25 von der Firma Jenoptik wurde durch eigene Messungen ermittelt. In der Abbildung lässt sich bereits eine hohe Ähnlichkeit der Ergebnisse erkennen.

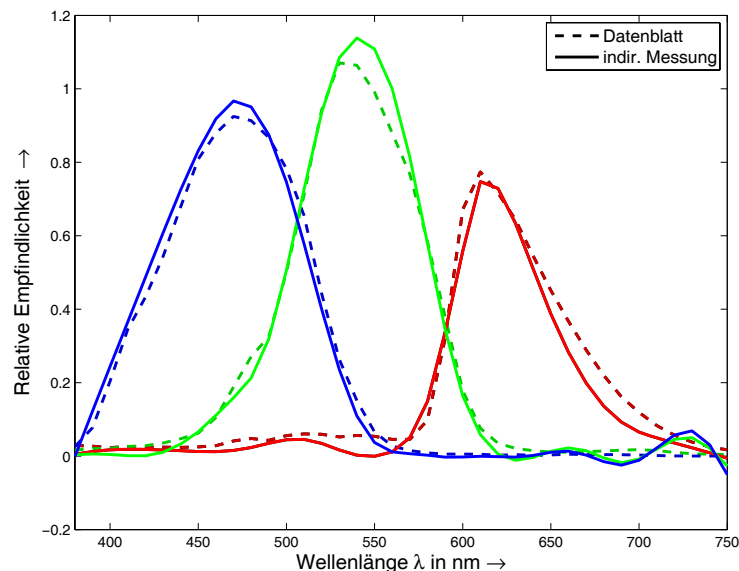


Abbildung 5.7: Das Ergebnis der indirekten Spektralschätzung im Vergleich zu Datenblattangaben

Zur Beurteilung des Schätzergebnisses werden die in Kapitel 4.4.1 und 4.4.2 vorgestellten Bewer-

tungskriterien angesetzt. Da die Optimierung auf diesem Probensatz stattgefunden hat, stellt die Anwendung der Bewertungskriterien auf diese Messergebnisse zwar kein geeignetes Mittel zur Beurteilung der Ergebnisgüte der indirekten Spektralschätzung dar, aber die Kriterien sind dennoch hilfreich, um die erreichbare Genauigkeit in der Optimierung bei bestimmten Eingangsdaten zu beurteilen. In Abbildung 5.8 sind die Ergebnisse für den Optimierungsprobensatz unter Anwendung der in Kapitel 5.1 beschriebenen Korrektur des Pixel-Übertragungsverhaltens dargestellt. Es ergibt sich eine durchschnittliche normierte Farbvektordifferenz von etwa 2,2 Promille und ein durchschnittlicher Abstand der rg-Koordinaten von etwa 1,9 Promille. Die insgesamt geringe Abweichung, die sich relativ gleichmäßig über alle Farbproben verteilt, zeigt, dass das spektrale Schätzergebnis sehr gut für alle Proben zu optimieren ist.

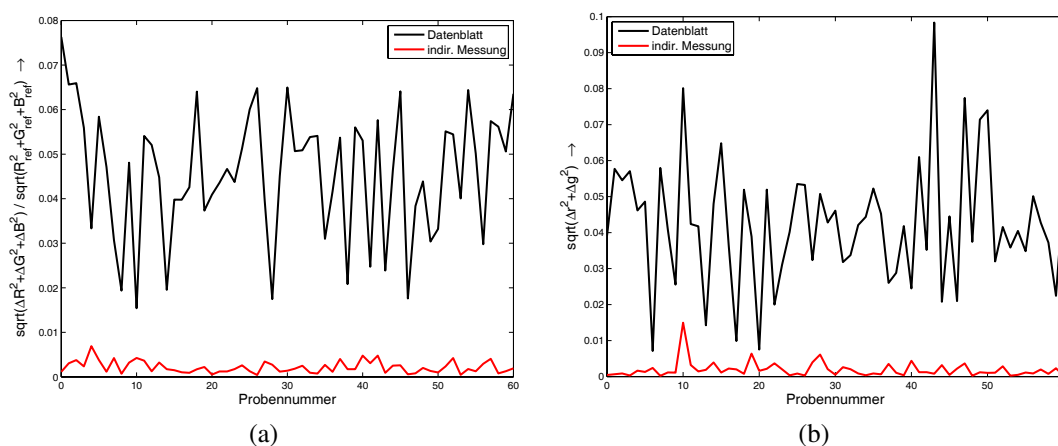


Abbildung 5.8: Bewertung der Spektralschätzung (Optimierungsprobensatz) für eine Kappa DXc100: Normierte Farbvektordifferenz (a) und chromatischer Abstand (b)

Die in Abbildung 5.7 gezeigten Ergebnisse der Spektralschätzung wurden unter Verwendung der in Kapitel 4.2.3 vorgestellten Kriterien des absoluten Fehlers, der Minimierung der Endwerte und des variabel gewichteten Glattheitskriteriums berechnet. Außerdem erfolgte eine Korrektur der Nichtlinearität in den Kamerareaktionen. An dieser Stelle soll dieses als optimal einzustufende Ergebnis mit den Resultaten ohne variable Gewichtung und ohne Korrektur verglichen werden.

Der quadratische Optimierungsansatz unter Verwendung des einfachen Glattheitskriteriums und Gewichtung nach Beziehung (5.2) führt zu den in Abbildung 5.9 dargestellten Empfindlichkeitsfunktionen. Im Vergleich zu den ebenfalls gezeigten Resultaten mit variabler Gewichtung ist hier eine etwas größere Restwelligkeit vor allem in den Funktionen des Grün- und Blaukanals bei etwa 600 nm zu erkennen. Eine Welligkeit im Sperrbereich der Empfindlichkeitsfunktionen ist bei den untersuchten Bildaufnahmesystemen aus physikalischer Sicht als unrealistisch einzustufen. Es ist eher eine typische, aber ungewünschte Eigenschaft der indirekten Spektralschätzung (vgl. Simulation in Kap. 4), die auf der Messunsicherheit basiert. Deshalb ist das Ergebnis mit variabler Gewichtung als geringfügig besser einzustufen.

In Abbildung 5.9(b) ist das Ergebnis der Spektralschätzung ohne Korrektur der Nichtlinearität

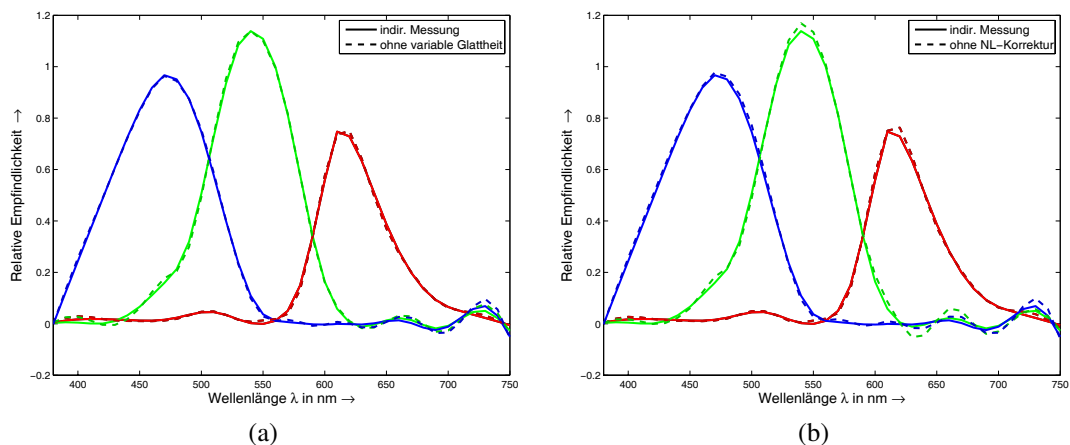


Abbildung 5.9: Das Ergebnis der indirekten Spektralschätzung ohne variabel gewichtetes Glattheitskriterium (a) und ohne Korrektur der Nichtlinearität (b) im Vergleich zum optimalen Schätzergebnis

nach Kapitel 5.1 dem optimalen Schätzergebnis gegenübergestellt. Dabei wird eine im Vergleich zu Abbildung 5.9(a) noch stärkere Welligkeit erkennbar, obwohl die untersuchte Kamera eine mit $NL = 1,18\%$ sehr geringe Nichtlinearität aufweist. Während die Korrektur für die untersuchten Bildaufnahmesysteme mit $NL < 2\%$ bereits notwendig ist, wird bei der Anwendung dieser indirekten Messmethode für Bildaufnahmesysteme mit schlechteren Leistungsparametern eine präzise Korrektur des Pixel-Übertragungsverhaltens als sehr wichtige Voraussetzung erachtet.

5.3 Direkte Messmethode

Im Gegensatz zur indirekten Messmethode werden bei der direkten Messmethode schmalbandige spektrale Strahlungsverteilungen verwendet. Die Erzeugung schmalbandiger Spektren kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Das als klassisch zu bezeichnende Verfahren basiert auf der Verwendung eines Monochromators zur Selektion eines schmalbandigen Ausschnitts aus dem Spektrum einer breitbandigen Lichtquelle. Dabei wird das Lichtquellenspektrum beispielsweise über ein reflektives Gitter örtlich aufgeteilt und anschließend ein bestimmter spektraler Anteil über einen Spalt selektiert. Durch Drehung des Gitters kann die Wellenlängenselektion gesteuert werden. Dieses Verfahren erfordert eine sequentielle Bildaufnahme für jeden schmalbandigen Spektralteil.

Zur Beschleunigung des Messverfahrens kann das örtlich aufgeteilte Spektrum direkt auf den Bildsensor projiziert werden. Dadurch kann die Spektralmessung basierend auf einer einzigen Bildaufnahme erfolgen. Mit diesem Ansatz lässt sich zwar keine spektrale Charakterisierung des gesamten Bildaufnahmesystems durchführen, aber die Transmission von Objektiven oder Filtern kann prinzipiell auch separat bestimmt werden. Dies setzt allerdings voraus, dass das Bildaufnahmesystem demontierbar ist. Ein solcher Ansatz wurde von Krüger als so genannte Spektrometer-

methode in [Krü04] vorgestellt. Dieses Messverfahren soll hier zur direkten Vergleichsmessung verwendet werden. Nachfolgend wird der verwendete Messaufbau betrachtet und anschließend erfolgt die Darlegung der Ergebnisse dieses direkten Verfahrens.

5.3.1 Messaufbau

Die von Krüger entwickelte Spektrometermethode basiert auf einer örtlichen Verteilung des Spektrums einer breitbandigen Lichtquelle mittels eines Prismas. Der Messaufbau ist in Abbildung 5.10 schematisch dargestellt.

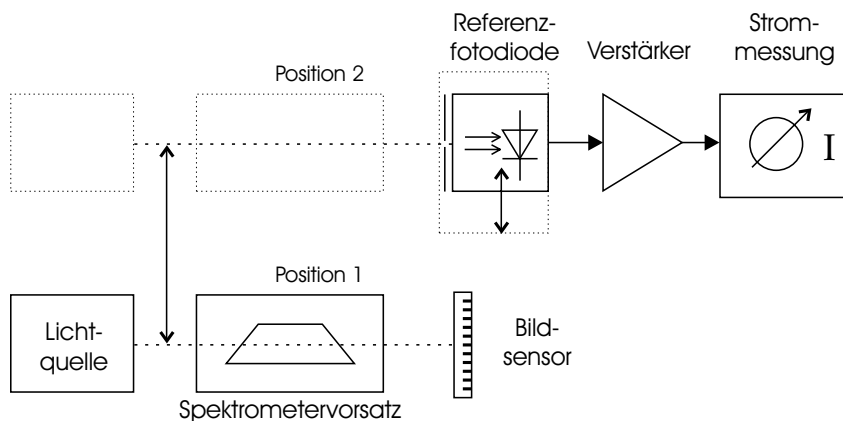


Abbildung 5.10: Schematische Darstellung des Messaufbaus der Spektrometermethode (eigene Darstellung in Anlehnung an [Krü04])

Das breitbandige Strahlungsspektrum der Lichtquelle gelangt durch einen schmalen Eintrittsspalt zu einem Prisma. Auf Grund der dispersiven Eigenschaft des Prismas erfolgt eine örtliche Aufteilung des Strahlungsspektrums. Dieses örtlich verteilte Spektrum kann wahlweise auf ein fotodiodenbasiertes Spektrometer oder auf den Bildsensor abgebildet werden. Die spektral vermessene Fotodiode dient zur Kalibrierung des Messaufbaus. Durch einen Spalt vor der Diode wird sichergestellt, dass nur ein bestimmter Ausschnitt des Spektrums zu ihr gelangt. Die Eigenschaft des Spaltes ist beim Bildsensor bereits durch die Pixelstruktur gegeben. Die Diode kann mittels einer Lineareinheit verschoben werden, um das komplette Spektrum abzutasten. Das Ausgangssignal der Diode wird verstärkt und von einem Messinstrument erfasst. Dieses ist direkt mit einem Computer gekoppelt, der zur Messdatenauswertung dient. Dadurch wurde ein scannendes Spektrometer realisiert.

Eine regelmäßige Kalibrierung des Messaufbaus ist eine notwendige Voraussetzung für das Verfahren, da es sehr empfindlich auf nur geringe mechanische Änderungen der Position des Spektrometervorsatzes oder der Bildebene der Sensoren reagiert. Aus diesem Grund ist der Messaufbau mit größter Sorgfalt zu betreiben, um verwertbare Messergebnisse zu erhalten. Zur Kalibrierung wird zunächst eine Lichtquelle mit ausgeprägten monochromatischen Anteilen eingesetzt, um die

in der Bildebene nichtlineare Zuordnung zwischen Position und Wellenlänge zu erfassen. Diese entsteht auf Grund der Nichtlinearität der Dispersion. Die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit erfolgt schließlich auf Basis eines Kontinuumstrahlers, zum Beispiel einer Wolfram-Halogen-Lichtquelle, da starke Unregelmäßigkeiten im Strahlungsspektrum zu hohen Messunsicherheiten führen würden.

Nach der Kalibrierung kann für einen oder auch mehrere Bildsensoren sequentiell die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit unter Berücksichtigung der ermittelten Kalibrier- und Korrekturfunktionen erfolgen. Detailliertere Betrachtungen des Messverfahrens sind [Krü04] zu entnehmen.

5.3.2 Ergebnisse

Unter Verwendung einer Wolfram-Halogen-Lichtquelle entsteht das in Abbildung 5.11 dargestellte spektral aufgefächerte Spektrum als Bild auf dem Sensor. Dabei wurden mehrere Aufnahmen bei unterschiedlichen Integrationszeiten verrechnet, um eine höhere Dynamik zu erreichen. Die Bilddaten sind logarithmisch in Falschfarbendarstellung gezeigt.

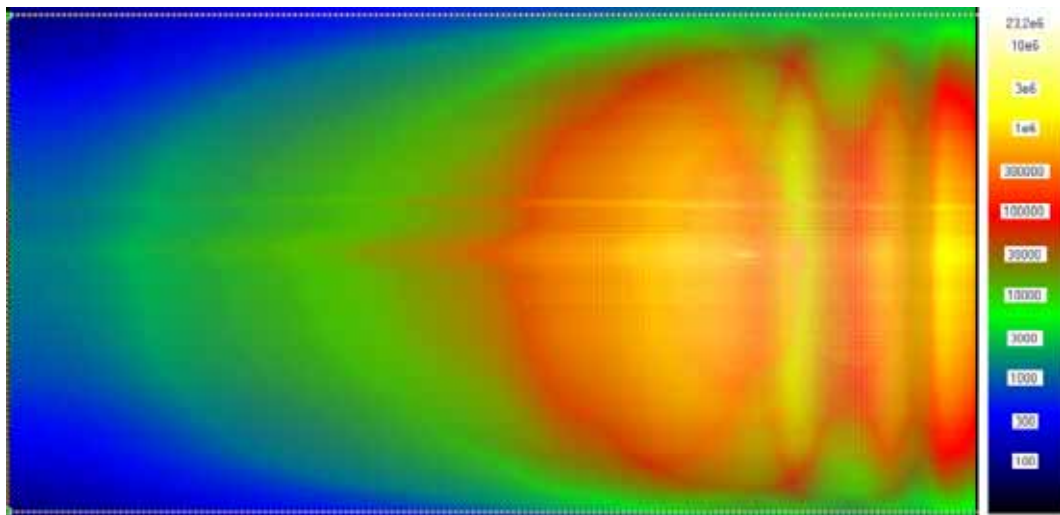


Abbildung 5.11: Das bei der Spektrometernmethode unter Einsatz einer Wolfram-Halogen-Lichtquelle entstehende Sensorbild

Die Auswertung der mittleren Zeilen des Sensorbildes ergibt die in Abbildung 5.12(a) dargestellten Verläufe der Kamerareaktionen auf das aufgefächerte Spektrum der Wolfram-Halogen-Lichtquelle. Dabei werden kurze Wellenlängen auf niedrige und lange auf hohe Pixelkoordinaten j abgebildet. Anhand des breiten Blaukanals gegenüber dem schmalen Rotkanal lässt sich der nichtlineare Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Pixelkoordinate erkennen. Unter Berücksichtigung dieses Zusammenhangs und der Intensitätsverteilung, die durch die kalibrierte Fotodiode ermittelt wurde, werden die relativen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen berechnet. In Abbildung 5.12(b) sind diese den Datenblattangaben gegenübergestellt, wiederum unter Einbe-

rechnung der Transmission des BG40-Filters und des Jenoptik Objektivs, um das gesamte Bildaufnahmesystem zu beurteilen.

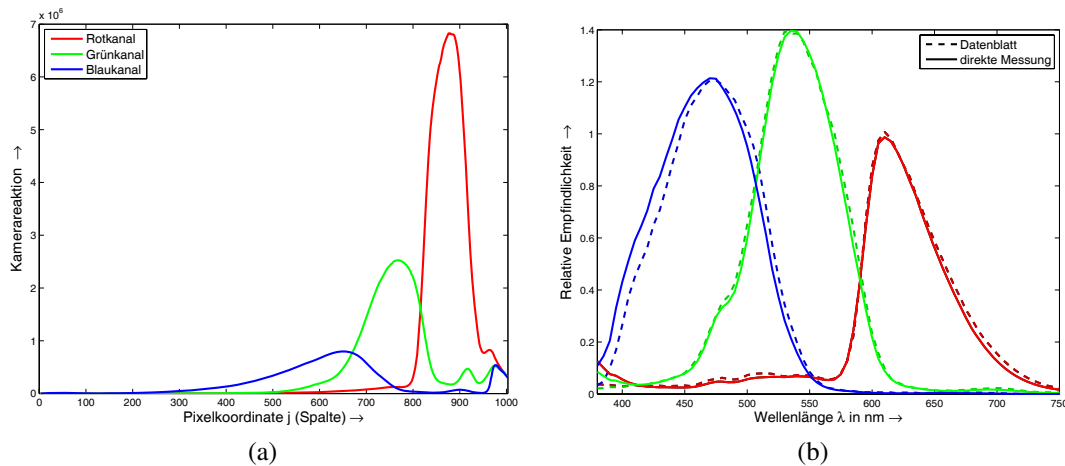


Abbildung 5.12: Kamerareaktionen über die Spalten des Sensorbildes (a) und daraus ermittelte spektrale Empfindlichkeit (b)

Eine zunächst qualitative Betrachtung lässt zwischen den Datenblattangaben und der direkten Messung eine recht gute Übereinstimmung erkennen. Lediglich im Blaukanal sind leichte Abweichungen zu beobachten. Die hohe Ähnlichkeit kann darauf zurückgeführt werden, dass die im Datenblatt angegebenen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen auch mit einer direkten Messmethode ermittelt wurden.

5.4 Gütetest

Als Bewertungsgrundlage für die Ergebnisgüte der Messverfahren werden Kamerareaktionen auf einen unabhängigen Testprobensatz ermittelt und mit einer Vorhersage auf Basis der spektralen Informationen verglichen. Dazu erfolgte eine Auswahl von weiteren 60 Filterfolien, die nicht im Messprobensatz enthalten sind. Anschließend wurden die Kamerareaktionen \mathbf{r}_{test} auf diesen Testprobensatz ermittelt und wiederum die Korrektur der Nichtlinearität vorgenommen.

Gleichzeitig wurden die spektralen Strahlungsverteilungen \mathbf{C}_{test} des Testfarbprobensatzes gemessen. Anschließend wurden unter Verwendung der direkt und der indirekt gemessenen spektralen Empfindlichkeiten \mathbf{s} nach $\mathbf{s}^T \cdot \mathbf{C}_{test}$ Vorhersagen für die zu erwartenden Kamerareaktionen getroffen. Die Abweichung zwischen den vorhergesagten und den ermittelten Kamerareaktionen wird schließlich mit den Gütekriterien aus Kapitel 4.4.1 und 4.4.2 bewertet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.13 dargestellt.

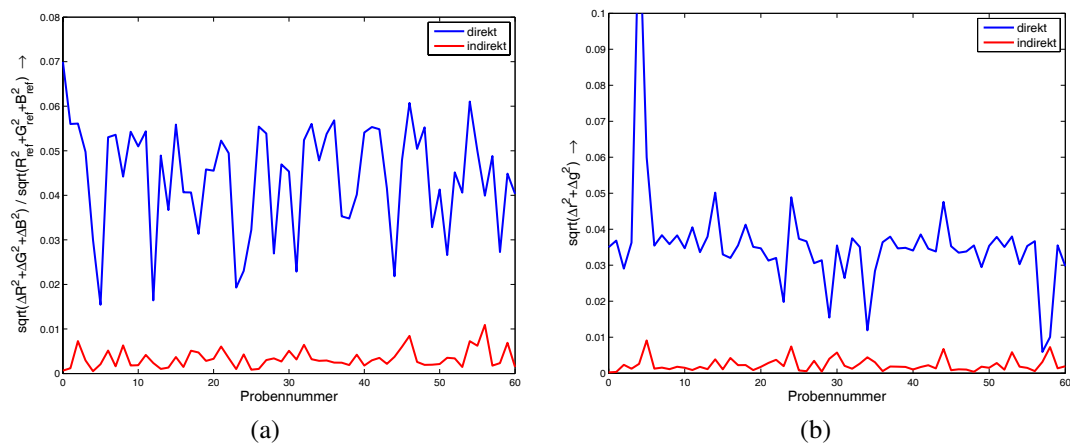


Abbildung 5.13: Gütetest von direkter und indirekter Messmethode: Normierte Farbvektordifferenz (a) und chromatischer Abstand (b)

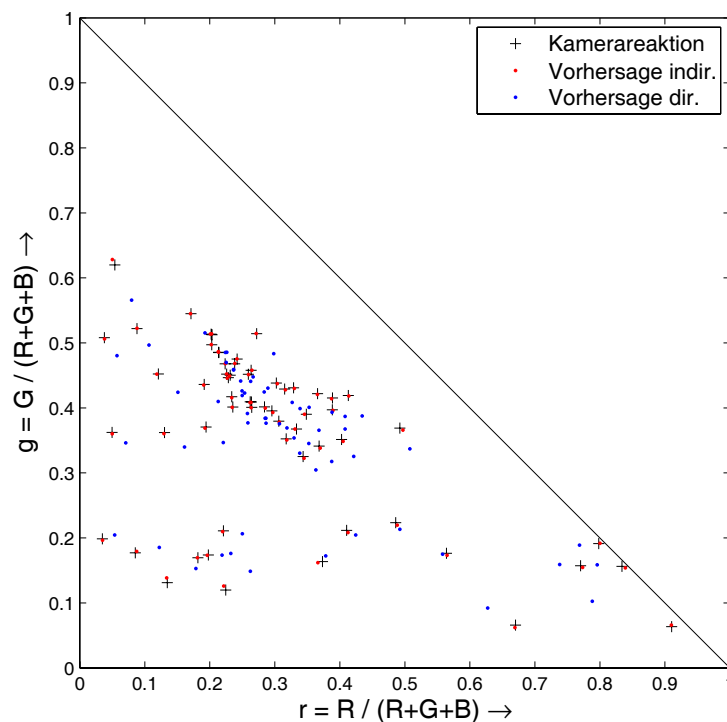


Abbildung 5.14: Vergleich von direkter und indirekter Messmethode im rg-Diagramm

Zur besseren Veranschaulichung des chromatischen Abstands sind in Abbildung 5.14 die Abweichungen im rg-Diagramm dargestellt. Während die Vorhersage auf Basis der indirekt bestimmten Empfindlichkeitsfunktionen sehr gut mit den wirklichen Kamerareaktionen übereinstimmt, liefern die direkten Messergebnisse deutliche Abweichungen. Dabei ist zu erkennen, dass die Abweichungen eine Vorzugsrichtung zu den Koordinaten $r = 0,5$ und $g = 0,2$ besitzen.

Als weitere Methode zur Veranschaulichung der Ergebnisgüte wurde die Grafik in Abbildung 5.15 erstellt. Die gezeigten Farbfelder basieren auf den Kamerareaktionen auf den Testfarbprobensatz. Alle Felder sind zweigeteilt: die obere Hälfte zeigt die wirkliche Kamerareaktion und die untere Hälfte die auf Basis des indirekten Messergebnisses vorhergesagte Kamerareaktion. Dem Ergebnis des indirekten Messverfahrens wird eine ausreichende Güte zugesprochen, da kaum visuelle Unterschiede in den Farbfeldern zu erkennen sind. Die visuelle Interpretation dieser Bilddatendarstellung besitzt allerdings den Nachteil, dass die Wahrnehmung der Unterschiede von den Eigenschaften des Wiedergabegeräts abhängt. Dadurch können beispielsweise auch unterschiedliche Farbwerte den gleichen Farbeindruck erzeugen. Diese Darstellungsweise ist folglich nur geeignet, um einen visuellen Eindruck zu bekommen, aber beinhaltet keine quantitativen Aussagen.

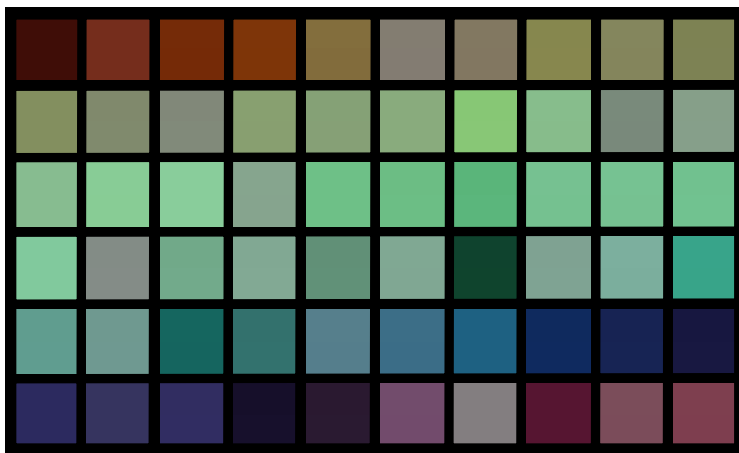


Abbildung 5.15: Bildvergleich von Kamerareaktion und Vorhersage auf Basis der indirekten Spektralschätzung

5.5 Diskussion

Es konnte gezeigt werden, dass das vorgestellte indirekte Messverfahren auf Basis von breitbandigen Farbproben und einer optimierungsbasierten Schätzmethode reproduzierbare Ergebnisse für die spektrale Empfindlichkeit eines Bildaufnahmesystems liefert. Die Güte der Ergebnisse wurde anhand eines vom Messprobensatz unabhängigen Testprobensatz festgestellt. Dennoch scheinen Messfehler in der spektralen Referenzmessung die Güte der indirekten Methode zu limitieren, da in der reinen Simulation wesentlich geringere Abweichungen im spektralen Schätzergebnis erreicht wurden. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der direkten und indirekten Messmethode wird ebenfalls durch die Messgenauigkeit der beiden unterschiedlichen Spektroradiometer begrenzt. Insgesamt weisen die Resultate der beiden Messmethoden, welche in Abbildung 5.16 nochmals gegenübergestellt sind, im Rahmen der Messgenauigkeit eine sehr hohe Ähnlichkeit auf.

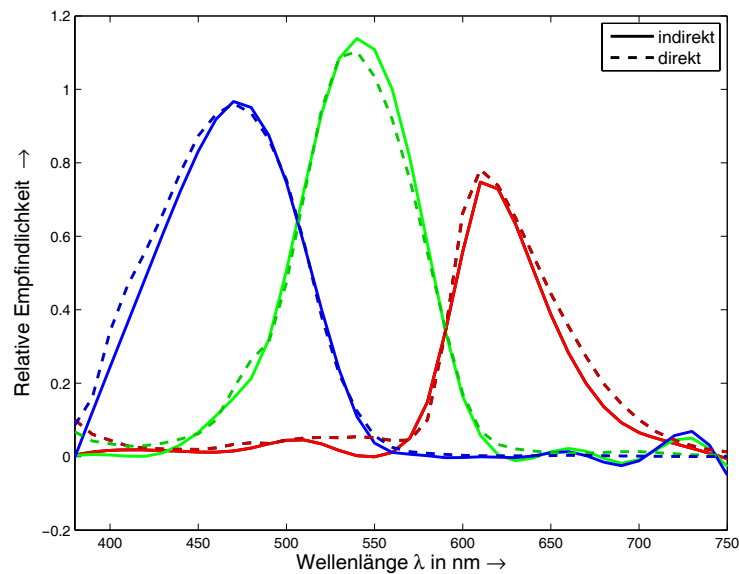


Abbildung 5.16: Das Ergebnis der indirekten Spektralschätzung im Vergleich zur direkten Messung unter Berücksichtigung von Filter und Objektiv

In Betrachtung des entwickelten Messverfahrens erweist sowohl die Methode als auch der Messaufbau eine Reihe von Vorteilen auf. Zunächst besitzen indirekte Verfahren den Vorteil der spektral breitbandigen Farbproben. Dadurch steht am Bildsensor eine vergleichsweise hohe Strahlungsleistung zur Verfügung, die bei direkten monochromatischen Verfahren auf Grund des schmalen spektralen Ausschnitts oftmals schwierig zu realisieren ist. Darauf basierend erlaubt die indirekte Methode die gezeigte spektrale Anpassung der Lichtquelle, die ebenfalls zu einer starken Reduktion der Strahlungsleistung führt. Diese Anpassung besitzt allerdings den großen Vorteil, dass eine gleichmäßige Strahlungsverteilung über den spektralen Messbereich erzeugt wird. Daraus ergibt sich eine hohe Stabilität in der Relation von spektralen Anteilen und es ermöglicht den Einsatz des Messaufbaus ohne ihn vor jeder Messung neu zu kalibrieren.

Weitere Vorteile liegen in der speziellen Architektur des Messplatzes. Die Transmissionsanordnung der optischen Komponenten und die Vermessung jeweils nur einer Farbprobe unter geringen Winkeln zur optischen Achse erlaubt gewisse Toleranzen in der Positionierung der Komponenten und verhindert Fehler durch Randabschattung oder unterschiedliche Betrachtungswinkel, wie sie bei Messungen mit Testkarten auf Grund der örtlich verteilten Farbproben entstehen können.

Des Weiteren bietet das in dieser Arbeit entwickelte indirekte Verfahren die Möglichkeit, ein gesamtes Bildaufnahmesystem, bestehend aus einem Bildsensor, optionalen Filtern und einem Objektiv, zu charakterisieren. Dies ist eine oftmals sinnvolle Herangehensweise zur Betrachtung und Kontrolle eines gesamten auszuliefernden Systems und manchmal sogar notwendig, wenn das System nicht demontierbar ist, wie zum Beispiel bei kompakten Digitalkameras.

6 Modellbasierte Optimierung der Farbkorrektur

Jedes Bildaufnahmesystem verfügt entsprechend seiner spektralen Empfindlichkeitsfunktionen über einen speziellen AufnahmeFarbraum. Dieser ist des Weiteren von der Aufnahmebeleuchtung abhängig. In diesem Kapitel wird auf Mechanismen fokussiert, die für eine optimale Abbildung eines AufnahmeFarbraums auf einen Wiedergabefarbraum sorgen. Diese Abbildung wird als Farbkorrektur bezeichnet. Der Wiedergabefarbraum lässt sich für alle in dieser Arbeit betrachteten Fälle als lineare Transformation aus dem Normvalenzsystem ableiten. Detailliertere Informationen zur Definition der Farbräume sind Kapitel 3 zu entnehmen.

In dieser Arbeit wird ein modellbasierter Ansatz zur Optimierung der Farbkorrektur-Transformation verwendet, welcher eine spektrale Charakterisierung des Bildaufnahmesystems voraussetzt (vgl. Kap. 4 und 5). Auf dieser Basis können verschiedene Bildaufnahmesysteme, Lichtarten und -quellen sowie reale und virtuelle Objekte in ihren spektralen Eigenschaften in der Optimierung berücksichtigt werden. Die verfahrenstechnischen Ansätze sollen als objektbasierte Methoden (*target based methods*) bezeichnet werden. Der wesentliche Vorteil dieser Methoden gegenüber ausschließlich spektral basierten liegt in der gezielten, optimalen Anpassung der Farbkorrektur für spezielle Anwendungsbedingungen.

Im Modell wird die chromatische Adaption des menschlichen Sehsystems (HVS) zur Berechnung eines Datensatzes berücksichtigt (s. Kap. 3.2.2). Die Farbkorrektur-Transformation wird auf dem einfachen linearen Ansatz nach Beziehung (3.9) aufgebaut. Darauf basierend werden Methoden vorgestellt, die eine Optimierung für mehrere verschiedene Aufnahmebedingungen ermöglichen, um die dynamische Anpassung des HVS optimal technisch nachempfinden zu können. Schließlich erfolgt eine Betrachtung der dynamischen Anpassung mit Bezug auf Farbkonstanzalgorithmen, welche im Wesentlichen für das maschinelle Sehen (*Machine Vision*) eine wesentliche Rolle spielen.

6.1 Einführung

Die Farbkorrektur dient der Verknüpfung oder Abbildung zwischen einem Ein- und einem Ausgabegerät für Farbbilddaten. Sie soll als Vorstufe des Farbmanagements, welches zur standardisierten Verknüpfung mehrerer beliebiger Ein- und Ausgabegeräte dient, aufgefasst werden. Die in diesem Kapitel beschriebenen Methoden und Untersuchungen können als Grundlage zur Erstellung eines ICC-Profiles für ein Farbbildaufnahmegerät dienen. Im Folgenden wird aber weniger auf eine

Geräteprofilierung sondern mehr auf grundlegende Mechanismen zur optimalen Anpassung eines Bildaufnahmesystems an das menschliche Sehsystem (HVS) fokussiert. Dazu ist vor allem das Verhalten des HVS zur Adaption an unterschiedliche Beleuchtungen zu berücksichtigen.

Die Farbkorrektur kann zunächst eine statische Transformation zwischen zwei Farbräumen, dem Aufnahme- und dem Wiedergabefarbraum, sein. Sie muss oftmals auch dynamische Eigenschaften besitzen, um eine Veränderung der Beleuchtungsverhältnisse, und damit des Aufnahmefarbraums, auszugleichen. In der Kameratechnik wird dies als Weißabgleich (*White Balancing*) bezeichnet, womit ein Abgleich auf den durch das Beleuchtungsspektrum definierten Weißpunkt gemeint ist. Dazu muss die Transformationsfunktion einen Mechanismus zur Einstellung der Farbbalance (*Color Balance*) bereitstellen.

Die konkrete Nutzung oder Umsetzung der Farbkorrektur-Funktion hängt in erster Linie von der Anwendung ab. In dieser Arbeit sollen zwei prinzipielle Systemansätze unterschieden werden, die der Bildwiedergabe- und die der Bildverarbeitungssysteme. Bildwiedergabesysteme dienen der Bildaufbereitung für die menschliche Betrachtung (*Human Vision*). In der Umsetzung ist das Adaptionsverhalten des HVS nachzubilden (Chromatische Adaption - *Chromatic Adaptation*). Im Gegensatz dazu wird unter Bildverarbeitungssystemen eine maschinelle Auswertung bestimmter Objekte und Abläufe verstanden (*Machine Vision*). Auch hier kann eine Anpassung an sich verändernde Aufnahmebedingungen erforderlich sein, aber meist mit dem Ziel, bestimmte, den Objekten zuordbare Farbwerte konstant zu halten (Farbkonstanz - *Color Constancy*). Der Begriff der Farbkonstanz wird allerdings in der Regel allgemein für dynamische Anpassungsalgorithmen zum Weißabgleich auf Basis von Bilddaten verwendet.

Das verwendete spektrale Modell beinhaltet eine zunächst grundlegende physikalische Betrachtung, die schließlich im Sinne der verfolgten Zielstellung zur Erzeugung korrespondierender Farbdaten für die Aufnahme und Wiedergabe dient. Dabei erlaubt die spektrale Charakterisierung der einzelnen Komponenten eine Modellierung jedes Anwendungssystems (s. a. [Bar99]). Auf der Basis des spektralen Modells können schließlich die höheren Ebenen des Farbsehens aufgebaut werden (vgl. Abb. 3.1). Die nachfolgend vorgestellten Farbkorrektur-Methoden verwenden trichromatische Farbdaten und es werden Ansätze zur chromatischen Anpassung berücksichtigt.

6.2 Methoden zur optimalen Matrizierung

Basierend auf Kapitel 3.2 sollen hier Methoden zur Berechnung optimaler linearer Farbkorrekturmatrizen \mathbf{A} für die Transformation von Farbtripeln \mathbf{t}_A eines Aufnahmefarbraums A zu korrespondierenden Farbtripeln \mathbf{t}_W in einem Wiedergabefarbraum W vorgestellt werden. In Analogie zu den inversen Verfahren wird zunächst die Methode der kleinsten Quadrate angewendet und anschließend werden die Verfahren der linearen und der quadratischen Optimierung für diesen Problemfall vorgestellt. Grundsätzlich wird eine Minimierung des Abstands zwischen $\mathbf{A} \cdot \mathbf{t}_A$ und \mathbf{t}_W angestrebt. Abschließend wird in einer Diskussion auf die Unterschiede in den ausgewählten Verfahren und den Möglichkeiten zur Verbesserung der Optimierungskriterien eingegangen.

6.2.1 Methode der kleinsten Quadrate

Die Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate (vgl. Kap. 3.5.1) zur Suche einer optimalen Linearkombination der Farbwerttripel \mathbf{t}_A zu jeweils einer Komponente i der Farbwerttripel \mathbf{t}_W führt zu dem Minimierungskriterium

$$\min \sum_{j=1}^O (\mathbf{t}_{W,i,j} - \mathbf{A}^{(i)} \cdot \mathbf{t}_{A,j})^2 \quad \text{mit} \quad \mathbf{A}^{(i)} = \begin{bmatrix} a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} \end{bmatrix} \quad \forall i \quad (6.1)$$

zur Ermittlung jeweils einer Zeile der Transformationsmatrix \mathbf{A} . Die Anwendung der Methode entsprechend Beziehung (6.1) für jede der drei Komponenten der Wiedergabetripel \mathbf{t}_W liefert eine optimale Transformationsmatrix \mathbf{A} . Analog zu den in Kapitel 4.2.1 beschriebenen inversen Verfahren gilt auch hier, dass die Einführung zusätzlicher Kriterien zur Optimierung der Matrixbesetzung nur bedingt und in der Regel dann nur umständlich möglich ist.

6.2.2 Lineare Optimierung

Als weitere Methode zur Optimierung einer Farbraumtransformationsmatrix soll die lineare Programmierung eingesetzt werden. Diese Methode stellt einen eleganten Ansatz dar, weil sie eine gezielte Optimierung in Abhängigkeit spezieller Nebenbedingungen ermöglicht. Es werden einige der bereits in [Kön01] aufgezeigten Möglichkeiten aufgenommen und auf Erweiterungsmöglichkeiten eingegangen.

Die Grundlagen der linearen Programmierung zur Lösung linearer Optimierungsprobleme wurden bereits in Kapitel 3.5.3 beschrieben und in Kapitel 4.2.2 zur indirekten Bestimmung der spektralen Kameraempfindlichkeit angewendet. Deshalb soll hier direkt auf deren Einsatz zur Optimierung einer Transformationsmatrix eingegangen werden. Im Gegensatz zum Minimierungskriterium der Methode der kleinsten Quadrate nach Beziehung (3.26) ist bei der linearen Programmierung eine lineare Zielfunktion erforderlich. Deshalb soll hier in Analogie zu Beziehung (4.4) die Summe der Beträge der Abweichungen entsprechend

$$\min \sum_{j=1}^O |u_j - \mathbf{c} \cdot \mathbf{v}_j| \quad (6.2)$$

minimiert werden. Um das LOP in seine Normalform zu transformieren, wird die Hilfsgröße δ mit $\delta_j = |u_j - \mathbf{c} \cdot \mathbf{v}_j|$ eingeführt und die Betragsgleichung in zwei Ungleichungen

$$\delta_j \geq u_j - \mathbf{c} \cdot \mathbf{v}_j \geq -\delta_j \quad \forall j \quad (6.3)$$

überführt. Diese lassen sich in einer Weise als Nebenbedingungen formulieren, so dass in der Zielfunktion $\sum \delta_j$ minimiert wird (vgl. Kap. 4.2.2). Auf der Suche nach einer optimalen Farbkorrekturmatri \mathbf{A} lassen sich nach obiger Umformung die Zielfunktionen

$$\min \sum_{j=1}^O |\mathbf{t}_{W,i,j} - \mathbf{A}^{(i)} \cdot \mathbf{t}_{A,j}| \quad \text{mit} \quad \mathbf{A}^{(i)} = \begin{bmatrix} a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} \end{bmatrix} \quad \forall i = \{1, 2, 3\} \quad (6.4)$$

als LOP formulieren und mithilfe der linearen Programmierung lösen.

Neben der mittleren betragsmäßigen Abweichung kann auch die maximale Abweichung ein wichtiges Minimierungskriterium sein. Die maximale Abweichung

$$\delta_{max} \geq \delta_j \quad \forall j \quad (6.5)$$

wird als zusätzliche Komponente zur Zielfunktion hinzugefügt. Um die mittlere und die maximale Abweichung unterschiedlich gewichten zu können, werden die Faktoren ω_{avg} und ω_{max} als Parameter eingeführt. Damit wird Beziehung (6.4) zu

$$\min \omega_{max} \cdot \delta_{max,i} + \frac{\omega_{avg}}{O} \cdot \sum_{j=1}^O |\mathbf{t}_{W,i,j} - \mathbf{A}^{(i)} \cdot \mathbf{t}_{A,j}| \quad \forall i = \{1, 2, 3\} \quad (6.6)$$

erweitert. Die Werte für ω_{avg} und ω_{max} unterliegen einer heuristischen Ermittlung. Diese Grundform des LOP soll zunächst den anderen Verfahren gegenübergestellt werden.

6.2.3 Quadratische Optimierung

Die Grundlagen zum Aufstellen quadratischer Optimierungsprobleme in ihrer Normalform sind den Kapiteln 3.5.4 und 4.2.3 zu entnehmen. Zunächst sollen auch hier die Kriterien berücksichtigt werden, die vorhergehend bei der linearen Programmierung eingeführt wurden, aber mit dem Unterschied, dass an der Stelle von Beträgen die Quadrate der Differenzen δ_j minimiert werden. Auch hier ist anzumerken, dass durch die quadratische Optimierung größere Abweichungen überproportional berücksichtigt werden, die das zusätzliche Kriterium des maximalen Fehlers δ_{max} überflüssig erscheinen lassen.

Damit erfolgt zunächst die Optimierung mit der Zielfunktion

$$\min \sum_{j=1}^O (\mathbf{t}_{W,i,j} - \mathbf{A}^{(i)} \cdot \mathbf{t}_{A,j})^2 \quad \text{mit} \quad \mathbf{A}^{(i)} = \begin{bmatrix} a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} \end{bmatrix} \quad \forall i \quad (6.7)$$

in Analogie zur Methode der kleinsten Fehlerquadrate nach Beziehung (6.1). Die quadratische Optimierung eröffnet aber auch die Möglichkeit, weitere Optimierungskriterien zu formulieren.

An dieser Stelle soll das Kriterium des geschützten Weißpunktes (WPP¹ nach Finlayson et al.) Erwähnung finden, welches in beiden Optimierungsansätzen (LOP und QOP) implementierbar ist (s. a. [FD97b], [FD97a]). Dabei wird der Matrix \mathbf{A} die Forderung auferlegt, dass das Farbwerttripel $\mathbf{t}_{A,ref}$, welches bei der Aufnahmebeleuchtung und Verwendung eines über die Wellenlänge

¹WPP - White Point Preserving

konstanten Objektspektrums entsteht, nach

$$\mathbf{t}_{W,ref} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{t}_{A,ref} \quad (6.8)$$

eindeutig auf das korrespondierende Tripel $\mathbf{t}_{W,ref}$ abzubilden ist. Dadurch wird gewährleistet, dass Farbwerte in der Unbuntachse exakt wiedergegeben werden. Diese Forderung ist auf Grund der Tatsache sinnvoll, dass das HVS auf Farbortverschiebungen nahe der Unbuntachse am empfindlichsten reagiert (s. z. B. [Hun04]). Dieses Kriterium wurde zusätzlich in die Basisformulierung des QOP aufgenommen und wird in der anschließenden Diskussion bewertet. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden vom Autor neue Kriterien zur Erweiterung dieser Basisform des QOP vorgestellt.

6.2.4 Diskussion

Die vorgestellten methodischen Ansätze sollen nun anhand eines Testszenarios bewertet werden. Dieses wird durch folgende Simulation realisiert. Zunächst werden Farbwerttripel \mathbf{t}_A nach

$$\mathbf{t}_A = \mathbf{s}_{RGB}^T \cdot \mathbf{S}_{D50} \cdot \mathbf{B}_{MCC} \quad (6.9)$$

unter Verwendung der im vorherigen Kapitel bestimmten spektralen Empfindlichkeitsfunktionen \mathbf{s}_{RGB} berechnet. Dabei wird die Normlichtart D50 als Aufnahmebeleuchtung angenommen und es werden in diesem allgemeinen Fall die Objektspektren des Macbeth ColorChecker (MCC) für die Optimierung verwendet (s. [Pas03]). Die Wiedergabe soll im Standardfarbraum sRGB erfolgen (s. Kap. 3.1.2). Für diesen Farbraum berechnen sich die geforderten Wiedergabetripel \mathbf{t}_W nach

$$\mathbf{t}_W = \mathbf{A}_{sRGB} \cdot \mathbf{M}_{CAT02}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{L_{D65,max}}{L_{D50,max}} & 0,0 & 0,0 \\ 0,0 & \frac{M_{D65,max}}{M_{D50,max}} & 0,0 \\ 0,0 & 0,0 & \frac{S_{D65,max}}{S_{D50,max}} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{M}_{CAT02} \cdot \mathbf{s}_{XYZ}^T \cdot \mathbf{S}_{D50} \cdot \mathbf{B}_{MCC} \quad (6.10)$$

entsprechend Beziehung (3.8). Die Farbkorrekturmatriix \mathbf{A} zur Abbildung von \mathbf{t}_A auf \mathbf{t}_W wird nun mithilfe der vorgestellten Methoden berechnet.

Zur Bewertung der Güte der berechneten Matrizen wird der umfangreiche, aus 1995 verschiedenen Objektspektren bestehende Testdatensatz aus [BMFC02] verwendet. Für diesen Testdatensatz wird der mittlere und der maximale Farbabstand ΔE_{94} nach Beziehung (3.19) ermittelt. Des Weiteren wird das Gütekriterium der Rauschübertragung $p\%$ nach Beziehung (3.25) berücksichtigt. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Aufnahmekanäle eine stochastische Unabhängigkeit aufweisen und dass die mittlere Varianz in den Kanälen der Aussteuerung bei der Aufnahmebeleuchtung (Index *ref*) entspricht. Daraus folgt die Besetzung der Kovarianzmatrix Σ_A nach

$$\Sigma_A = \text{diag}(\mathbf{t}_{A,ref}) \quad (6.11)$$

	LSQ	LOP	QOP	QOP mit WPP
$\overline{\Delta E_{94}}$	2,52	2,66	2,52	2,46
$\Delta E_{94,max}$	10,42	11,39	10,42	10,79
$p\%$	-11,7%	-13,9%	-11,7%	-10,9%

Tabelle 6.1: Vergleich der Güte der vorgestellten Verfahren

als Diagonalmatrix mit $\mathbf{t}_{A,ref}$, den Farbwerttripeln bei der Aufnahmebeleuchtung. Es wird folglich angenommen, dass das Photonenrauschen der dominierende Rauschanteil ist (vgl. Kap. 2.2.5). Die Ergebnisse für die verschiedenen Methoden sind in Tabelle 6.1 aufgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass alle Verfahren zur Berechnung von Farbkorrekturmatrizen mit ähnlicher Güte führen. Entsprechend der Erwartung liefert die quadratische Optimierung unter Minimierung des quadratischen Fehlers als Basiskriterium das gleiche Ergebnis wie die Methode der kleinsten Quadrate. Da mittels linearer Optimierung in allen Kriterien die schlechteste Güte erzielt wurde, wird diese Methode nicht weiter verfolgt. Die quadratische Optimierung wurde zusätzlich mit dem Kriterium des geschützten Weißpunktes getestet. Es liefert leichte Verbesserungen hinsichtlich des mittleren ΔE - und des Rauschübertragungs-Kriteriums. Gleichzeitig wird der maximale Farbabstand im Testprobensatz etwas erhöht. Dennoch wird diese Methode als die beste Basis für die nachfolgend vorgestellten Erweiterungen erachtet.

6.3 Rauschstabile Matrizierung

Die bisher vorgestellten Optimierungsmethoden zielen zunächst ausschließlich auf eine optimale Farbtreue der reproduzierten Bilddaten. An dieser Stelle sollen zusätzliche Optimierungskriterien zum Erlangen einer möglichst geringen Übertragung oder sogar Dämpfung des Bilddatenrauschens eingeführt werden. Das Ziel besteht in einer Optimierung des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) und der methodische Ansatz soll als rauschstabile Matrizierung bezeichnet werden.

Zur Einführung eines Optimierungskriteriums zur Maximierung des SNR wird auf das Gütekriterium zur Bewertung des Farbrauschens nach Beziehung (3.23) Bezug genommen. Eine Maximierung des SNR bedeutet für die Besetzung der Transformationsmatrix \mathbf{A} eine Minimierung des Rauschens bei näherungsweise konstantem Signalwert. Da die Bewertung des Rauschens in Farbdaten auf ein Luminanzsignal bezogen wird, welches durch eine Gewichtung der Farbkomponenten das Hellempfinden des menschlichen Sehsystems beschreibt, sind eben diese Gewichtungsfaktoren, in (3.23) mit \mathbf{A}_Y bezeichnet, bei der Optimierung zu berücksichtigen. Dazu werden nachfolgend einige Ansätze zur Optimierung vorgestellt.

6.3.1 Optimierung der Kanaldifferenz

Zur Berücksichtigung des Gütekriteriums des Rauschens oder der Varianz in den transformierten Farbdaten soll zunächst eine Begrenzung der Kanaldifferenz als zusätzliches Kriterium in die quadratische Optimierung aufgenommen werden. Als Basis dienen die bisher vorgestellten Kriterien zur Minimierung des Farbabstands und zum Schützen des Weißpunkts.

Dieses zusätzliche Kriterium beruht auf dem Ansatz, dass sich das SNR verschlechtert, wenn durch negative Koeffizienten in $\mathbf{A}^{(i)}$ Signalanteile einer Farbkomponente aus \mathbf{t}_A abgezogen werden, sich die jeweiligen Rauschanteile aber geometrisch addieren. Daraus folgt das Kriterium

$$-a_{ij} \leq \frac{p}{\mathbf{A}_{Y,i}} \cdot a_{ii} \quad \forall i \neq j \quad \text{mit} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

mit einem einstellbaren Begrenzungsanteil $p/\mathbf{A}_{Y,i}$. Während der Grenzwert p unabhängig von der jeweiligen Farbkomponente von \mathbf{t}_W gewählt werden kann, wird mit $\mathbf{A}_{Y,i}$ eine Gewichtung der Farbkomponenten entsprechend des Gütekriteriums in Beziehung (3.23) vorgenommen. Im Extremfall werden für $p = 0$ die Koeffizienten auf den positiven Wertebereich beschränkt. Es bleibt anzumerken, dass dieser Ansatz nur auf die Optimierung von linearen Abbildungen zwischen ähnlichen Farbräumen, in diesem Fall RGB-Farbräumen, zielt.

Die quadratische Optimierung eröffnet aber auch die Möglichkeit, ein dem Gütekriterium der Störungsübertragung nahe liegendes Optimierungskriterium durch Bildung der Quadratsumme zu formulieren. Diese Variante wird im folgenden Unterkapitel gesondert betrachtet.

6.3.2 Optimierung der Quadratsumme

Das Optimierungskriterium der Quadratsumme basiert auf dem Ansatz, die Varianz $\sigma_{W,i}^2$ jeder Wiedergabefarbkomponente i , welche sich in Analogie zu Beziehung (3.21) mit

$$\sigma_{W,i}^2 = \mathbf{A}^{(i)} \cdot \Sigma_A \cdot \mathbf{A}^{(i)T} \quad (6.13)$$

berechnen lässt, zu minimieren. Dieses Kriterium lässt sich direkt in die Normalform eines quadratischen Optimierungsproblems (vgl. Bez. (3.34)) übernehmen. Um eine Gewichtung mit den anderen Kriterien zu ermöglichen, wird der Faktor ω_{noise} eingeführt. Daraus ergibt sich

$$\min \omega_{noise} \cdot \mathbf{A}^{(i)} \cdot \Sigma_A \cdot \mathbf{A}^{(i)T} \quad (6.14)$$

als Erweiterung der Zielfunktion des QOP. Diese Form ermöglicht eine gezielte Minimierung der Varianz $\sigma_{W,i}^2$ in jedem Wiedergabefarbkanal. Da aber entsprechend Kapitel 3.4.4 nicht jeder Farbkanal in gleichem Maß zur visuellen Wahrnehmung von Farbrauschen beiträgt, soll eine zu-

sätzliche Gewichtung mit \mathbf{A}_Y eingeführt werden. Daraus folgt das Minimierungskriterium

$$\min \omega_{noise} \cdot \mathbf{A}_{Y,i} \cdot \mathbf{A}^{(i)} \cdot \Sigma_A \cdot \mathbf{A}^{(i)T} \quad (6.15)$$

zur Optimierung jeder Zeile i der Farbkorrekturmatrix \mathbf{A} . Auf diese Weise kann die Optimierung der Farbkorrekturmatrix weiterhin zeilenorientiert für jeden Wiedergabefarbkanal erfolgen und es wird eine Kompromissfindung zwischen der Güte der Farbproduktion und der Rauschstabilität ermöglicht.

6.3.3 Empfindungsgemäße Optimierung

Eine vollständige Bewertung der Kovarianzmatrix Σ_W im Wiedergabefarbraum entsprechend der menschlichen Empfindung nach Beziehung (3.23) erfordert die Aufstellung des gesamten Optimierungsproblems zur Ermittlung der Farbkorrekturmatrix \mathbf{A} als Normalform. Dadurch müssen die Differenzen δ für alle Farbkanäle und alle Objekte in den gesuchten Vektor \mathbf{x} der Zielfunktion aufgenommen werden und die Koeffizienten von \mathbf{A} ergeben sich nach

$$\mathbf{x} = \left[a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ a_{21} \ a_{22} \ a_{23} \ a_{31} \ a_{32} \ a_{33} \ \dots \right]^T \quad (6.16)$$

als Teil des Vektors \mathbf{x} , dem Ergebnis der quadratischen Optimierung (vgl. Kap. 3.5.4). Zur Nutzung des Gütekriteriums nach Beziehung (3.23) als Optimierungskriterium nach

$$\min \omega_{noise} \cdot \mathbf{A}_Y \cdot \mathbf{A} \cdot \Sigma_A \cdot \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A}_Y^T \quad (6.17)$$

werden der Gewichtungsfaktor ω_{noise} , die Luminanzbewertung nach \mathbf{A}_Y und die Kovarianzmatrix im Aufnahmebraum Σ_A in eine 9×9 -Matrix als Teil der quadratischen Matrix \mathbf{H} des QOP überführt. Dadurch erfolgt eine direkte Minimierung der Varianz σ_Y^2 zur Optimierung des SNR im Wiedergabefarbraum im Sinne der menschlichen Empfindung. Diese Methode stellt eine neue Form zur empfindungsgemäßen Optimierung des SNR in reproduzierten Farbbilddaten dar.

Dieser Ansatz hat aber auf Grund der hier betrachteten Wiedergabefarbtripel eine Verdreifachung der Matrizen und Vektoren in jeder Dimension im Vergleich zur bisherigen zeilenweisen Optimierung von \mathbf{A} zur Folge. Daraus ergeben sich Restriktionen bezüglich der Anzahl der einsetzbaren Objektspektren für eine Optimierung unter Berücksichtigung eines begrenzten Speichervolumens für die numerische Berechnung. Diese Restriktion wird im nachfolgenden Kapitel bei der Optimierung von Multi-Beleuchtungsmatrizen eine noch stärkere Ausprägung erhalten.

6.3.4 Diskussion

Zur Bewertung der vorgestellten methodischen Ansätze wird eine Simulation durchgeführt, die auf dem in Kapitel 6.2.4 beschriebenen TestszENARIO basiert. Unter den dort beschriebenen Bedingungen, Aufnahmebeleuchtung D50, Bildaufnahmesystem s_{RGB} aus Kapitel 4 und 5 und Wieder-

gabefarbraum sRGB, wird eine zwischen der Güte der Farbproduktion und der Rauschstabilität gewichtete Optimierung durchgeführt. Zur Beurteilung der Methoden wird für unterschiedliche Gewichtungen der Rauschübertragungswert $p\%$ gegenüber dem mittleren Farbabstand $\overline{\Delta E_{94}}$ für die genannten 1995 Farbproben aufgetragen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.1 visualisiert.

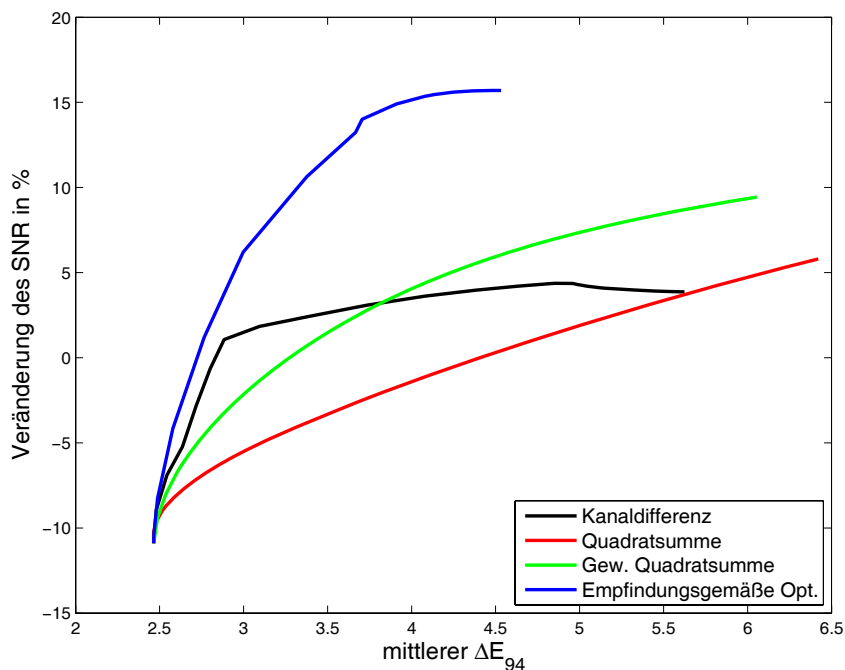


Abbildung 6.1: Vergleich der Verfahren zur rauschstabilen Matrizierung

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass entsprechend der Erwartung bei $\omega_{noise} = 0$ alle Verfahren die gleichen Werte für $p\%$ und $\overline{\Delta E_{94}}$ wie in Tabelle 6.1 für das QOP mit WPP erzielen. Für $\omega_{noise} > 0$ verbessert sich jeweils die Rauschübertragung und die Güte der Farbproduktion verschlechtert sich. Dabei weisen aber die verschiedenen Verfahren sehr unterschiedliche Ergebnisse bezüglich des Verhältnisses der beiden Gütekriterien auf. Die Methode auf Basis der Kanaldifferenz zeigt zunächst die Möglichkeit auf, die Rauschübertragung um etwa 12 % zu verbessern bei einer Vergrößerung des mittleren Farbabstandes auf etwa 2,8. Die auf der Quadratsumme basierenden Verfahren ermöglichen zwar einerseits ein höheres SNR im Wiedergabefarbraum, aber gleichzeitig ergeben sich auch größere mittlere Farbabstände. Grundsätzlich zeigt die mit A_Y gewichtete Quadratsumme bessere Resultate als die ohne Gewichtung. Die mit Abstand beste Methode stellt die vom Autor entwickelte empfindungsgemäße Optimierung der Rauschübertragung dar. Sie ermöglicht die höchste Rauschunterdrückung bei gleichzeitig geringen Verschlechterungen in der Farbproduktion auf. Auf diese Weise können Verbesserungen des SNR von über 25 % erzielt werden.

6.4 Optimale Multi-Beleuchtungs-Matrizierung

Die bisher vorgestellten Methoden dienen der Optimierung einer Farbkorrekturmatrix \mathbf{A} für einen festen Aufnahme- und Wiedergabefarbraum. Diese Verfahren sind für alle Anwendungen, in denen ein konstantes Beleuchtungsspektrum vorherrscht, anwendbar, zum Beispiel in der Endoskopie oder in vielen Bereichen der Qualitätskontrolle. Es gibt aber auch zahlreiche Anwendungen, beispielsweise im Außenbereich, die ständigen Veränderungen des Beleuchtungsspektrums unterliegen. Es wäre zwar prinzipiell möglich, für jedes auftretende Beleuchtungsspektrum eine Farbkorrekturmatrix zu berechnen, aber es ist in der Regel nicht möglich, anhand von beliebigen Farbbilddaten mehr als drei Parameter zur Beleuchtungsanpassung zu ermitteln. Die Anzahl von drei Parametern ist hingegen typisch, da die Anpassungsstrategien meistens auf die Ermittlung der drei Farbkomponenten einer Weißreferenz abzielen (s. a. [FJ03a]). Deshalb wird der Optimierung der Farbbildreproduktion unter wechselnden Lichtbedingungen, womit ausschließlich spektrale Änderungen gemeint sind, eine separate Klasse von Verfahren zugeordnet, die einen einfachen Mechanismus mit wenigen Parametern zur optimalen Farbanpassung ermöglichen.

Diese Verfahren erfordern zunächst eine Erweiterung der einfachen linearen Farbkorrekturmatrix und sollen mit dem Begriff Multi-Beleuchtungs-Matrizierung belegt werden. Dazu werden nachfolgend einige Ansätze vorgestellt und diskutiert. Während die Doppelmatrix und die PCA-basierte Methode aus der Literatur aufgegriffen werden, stellt die Triplematrix eine neue, vom Autor entwickelte Methode dar. Die Transformationsverfahren sind als notwendige Voraussetzung aufzufassen, um einer Kamera einen Mechanismus zur Anpassung an verschiedene Beleuchtungen bereitzustellen. Sie erfordern eine zusätzliche Intelligenz, die anhand der Bilddaten für eine dynamische Adaption sorgt. Auf solche Algorithmen soll in einem weiteren Unterkapitel kurz eingegangen werden, um die Thematik zu vervollständigen. Zur detaillierteren Auseinandersetzung mit Adaptionalgorithmen kann an dieser Stelle aber nur auf andere Arbeiten verwiesen werden.

6.4.1 Doppelmatrix

Das so genannte Doppelmatrix-Modell besteht aus einer Verkettung von einer allgemeinen linearen Transformationsmatrix \mathbf{A} , welche entsprechend Beziehung (3.9) auf die Farbtripel des Aufnahme- und Wiedergabefarbraums \mathbf{t}_A angewendet wird und einer nachgeschalteten Diagonalmatrix \mathbf{D} . Daraus ergeben sich nach

$$\mathbf{t}_W = \mathbf{D} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{t}_A \quad \text{mit} \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

die Farbtripel im Wiedergabefarbraum \mathbf{t}_W . Bei der Transformationsmatrix \mathbf{A} handelt es sich um eine Matrix mit festen Koeffizienten, die für eine bestimmte Aufnahmebeleuchtung und den gewünschten Wiedergabefarbraum optimiert wird. Für diesen Fall stellt die Diagonalmatrix \mathbf{D} eine Einheitsmatrix \mathbf{E} dar. Bei Veränderung der Aufnahmebeleuchtung können schließlich mithilfe von \mathbf{D} Anpassungen für die Farbwerttripel \mathbf{t}_W vorgenommen werden.

Zur Berechnung von \mathbf{A} für eine Aufnahmebeleuchtung \mathbf{S}_A und mit $\mathbf{D} = \mathbf{E}$ können zunächst die Basisalgorithmen aus Kapitel 6.2.3 angesetzt werden. Um die Farbkorrekturmatrix \mathbf{A} für eine zusätzliche zweite Aufnahmebeleuchtung \mathbf{S}_{A2} und damit zusätzliche Farbdatensätze \mathbf{t}_{A2} und \mathbf{t}_{W2} zu optimieren, muss der Ansatz in Beziehung (6.18) in das QOP aufgenommen werden. Das Ziel besteht darin, die Matrix \mathbf{A} für beide Beleuchtungen zu optimieren, wobei dem zweiten Datensatzpaar die Freiheitsgrade der Diagonalmatrix überlassen werden. Da aber in die Nebenbedingungen eines QOP keine Produkte aus zwei Unbekannten (Koeffizienten aus \mathbf{A} und \mathbf{D}) formuliert werden können, muss Beziehung (6.18) für die Optimierung umgeformt werden. Das führt zur Minimierung weiterer Differenzwerte, die sich in Analogie zu Beziehung (6.7) nach

$$\delta_{i,j} = \frac{1}{d_i} \cdot \mathbf{t}_{W2,i,j} - \mathbf{A}^{(i)} \cdot \mathbf{t}_{A2,j} \quad \forall i = \{1, 2, 3\}, j = \{1, \dots, O\} \quad (6.19)$$

berechnen lassen. Damit lässt sich die Zielfunktion des QOP für jedes weitere Datensatzpaar \mathbf{t}_{AX} und \mathbf{t}_{WX} mit

$$\min \sum_{j=1}^O \left(\frac{1}{d_{X,i}} \cdot \mathbf{t}_{WX,i,j} - \mathbf{A}^{(i)} \cdot \mathbf{t}_{AX,j} \right)^2 \quad \forall i = \{1, 2, 3\} \quad (6.20)$$

erweitern, um eine optimale Matrix \mathbf{A} für alle Aufnahmebeleuchtungen und eine optimale Matrix \mathbf{D}_X für jede einzelne zu berechnen.

Der methodische Ansatz in Beziehung (6.18) wurde von Finlayson als verallgemeinerte Diagonal-Transformation (*generalized diagonal transform*) bezeichnet (s. [FDF93], [FDF94]). Dabei lässt sich die Diagonalmatrix sowohl für eine chromatische Adaption im Sinne des HVS als auch für eine Farbkonstanz in der maschinellen Bildauswertung einsetzen. Mithilfe der Koeffizientenmatrix \mathbf{A} können ausgehend von den Empfindlichkeitsfunktionen \mathbf{s} des Bildaufnahmesystems neue Basisvektoren für den Farbraum zum Weißabgleich berechnet werden. Dadurch werden die Mechanismen zum Weißabgleich unabhängig von den Empfindlichkeitsfunktionen des Sensors, da die Koeffizientenmatrix \mathbf{A} für jeden Sensor angepasst werden kann. Mithilfe der Diagonalmatrix \mathbf{D} kann schließlich eine Feinabstimmung erfolgen, um sowohl Fertigungstoleranzen als auch Veränderungen durch Alterung einer Lichtquelle auszugleichen. Auf diese Weise können beispielsweise auch Herstellungstoleranzen des gesamten Bildaufnahmesystems ausgeglichen werden, wobei diese in der Regel gegenüber den Veränderungen der Beleuchtung geringer ausfallen.

6.4.2 PCA-basierte Farbkorrektur-Methode

Die meisten der bislang vorgestellten Verfahren basieren auf Optimierungsalgorithmen, in erster Linie der quadratischen Optimierung. An dieser Stelle soll ein moderner Ansatz zur Multi-Beleuchtungs-Korrektur auf Basis einer statistischen Analyse dargelegt werden. Das Verfahren wird beispielsweise in [FJ03a] und [FJ03b] beschrieben. Der Kern der Methode besteht in einer Hauptkomponentenanalyse (PCA²) mehrerer linearer Farbkorrekturmatrizen.

²PCA - Principal Component Analysis

Ausgangspunkt für das Verfahren ist die Berechnung von jeweils einer Farbkorrekturmatri \mathbf{A} zu einer Reihe verschiedener Aufnahmebeleuchtungen. Dazu kann eine der in Kapitel 6.2 vorgestellten Methoden verwendet werden. Die sich ergebenden 3×3 -Matrizen \mathbf{A} werden anschließend zeilenweise in neunelementige Vektoren \mathbf{a} überführt. Es resultiert eine neundimensionale Matrix, welche Farbkorrekturmatri \mathbf{A} entsprechend der Anzahl der berücksichtigten Beleuchtungen enthält. Auf diesen Satz von Matrizen wird die PCA angewendet, um den Satz auf neun Basisvektoren \mathbf{v}_i zu reduzieren. Anschließend wird ein Vektor \mathbf{a}_0 als Mittelwert der neun Basisvektoren gebildet. Die ermittelten zehn Vektoren werden wiederum zu 3×3 -Matrizen \mathbf{V}_i und \mathbf{A}_0 zurückgewandelt. Mithilfe dieser Matrizen lassen sich nach

$$\mathbf{A} = \sum_{i=1}^9 c_i \cdot \mathbf{V}_i + \mathbf{A}_0 \quad \forall i = \{1, \dots, 9\} \quad (6.21)$$

durch Linearkombination mit den Faktoren c_i alle Farbkorrekturmatri \mathbf{A} berechnen. In [FJ03a] und [FJ03b] wird gezeigt, dass man die Dimension des Basissatzes auf drei reduzieren kann, ohne größere Verschlechterungen in der Farbkorrektur zu erhalten. Danach lässt sich Beziehung (6.21) zu

$$\mathbf{A} \approx c_1 \cdot \mathbf{V}_1 + c_2 \cdot \mathbf{V}_2 + c_3 \cdot \mathbf{V}_3 + \mathbf{A}_0 \quad (6.22)$$

vereinfachen. Damit werden nur noch die drei Faktoren c_1 bis c_3 als Parameter benötigt, um eine optimale Farbkorrekturmatri \mathbf{A} für die jeweils vorherrschende Beleuchtung zu kombinieren. Nach Ansicht von Funt und Jiang können für einen Weißabgleich diese drei Faktoren ebenso aus Farbbilddaten ermittelt werden wie bei vielen anderen Verfahren beispielsweise drei Parameter für eine RGB-Faktorisierung gewonnen werden.

6.4.3 Triplematrix

Das Triplematrix-Modell stellt eine eigene Erweiterung des oben beschriebenen Doppelmatrix-Modells dar. Der Vorteil der Triplematrix besteht in der Ermittlung eines optimalen unabhängigen Farbraums für den Weißabgleich bei variierender Beleuchtung. Während bei der Doppelmatrix der Weißabgleich näherungsweise im Wiedergabefarbraum stattfindet, wird dafür bei der Triplematrix durch eine zusätzliche lineare Koeffizientenmatrix ein unabhängiger Farbraum zur Verfügung gestellt. Damit berechnen sich die Wiedergabefarbtupel \mathbf{t}_W nach

$$\mathbf{t}_W = \mathbf{A}_O \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{A}_I \cdot \mathbf{t}_A \quad \text{mit} \quad \mathbf{A}_O = \begin{bmatrix} a_{O11} & a_{O12} & a_{O13} \\ a_{O21} & a_{O22} & a_{O23} \\ a_{O31} & a_{O32} & a_{O33} \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

mit der eingangsseitigen Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_I und der zusätzlichen ausgangsseitigen \mathbf{A}_O . Dieser Ansatz ermöglicht die Verwendung eines internen RGB-Farbraums, der für eine chromatische Adaption oder zur Farbkonstanz-Aussteuerung für die berücksichtigten Aufnahmebeleuchtungen optimal geeignet ist. Zur Anpassung dient wiederum die variable Diagonalmatrix \mathbf{D} . Die Matrizen

\mathbf{A}_I und \mathbf{A}_O sind für ein Bildaufnahmesystem, einen Wiedergabefarbraum und einen Satz Aufnahmebeleuchtungen zu optimieren und besitzen zur Laufzeit eines Systems in der Regel feste Koeffizienten. Eine Ausnahme bilden Kameras, deren Wiedergabefarbraum vom Benutzer dynamisch wählbar ist (z. B. sRGB oder Apple-RGB). In diesem Fall muss für jeden zur Verfügung gestellten Wiedergabefarbraum eine Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_O ermittelt und bereit gehalten werden, um diese bei Bedarf zu wechseln.

Zur Optimierung der Matrizen wird ein ähnlicher Ansatz wie bei der Doppelmatrix verfolgt. Dort wurde bereits erwähnt, dass sich in den Nebenbedingungen eines QOP keine Produkte aus zwei oder sogar mehr Unbekannten bilden lassen. Dies konnte durch Kehrwertbildung umgangen werden. In diesem Fall sind hingegen drei Unbekannte (\mathbf{A}_I , \mathbf{D} und \mathbf{A}_O) zu ermitteln. Da diese Problemstellung nicht als QOP formulierbar ist, müssen nach

$$d_i = \frac{\mathbf{t}_{WX,ref,i}}{\mathbf{t}_{AX,ref,i}} \quad \forall i = \{1, 2, 3\} \quad (6.24)$$

die drei Koeffizienten jeder Diagonalmatrix anhand der für die jeweilige Beleuchtung erzeugten Farbdatensätze \mathbf{t}_{AX} und \mathbf{t}_{WX} vor der Optimierung berechnet werden. Um die Koeffizienten der Matrizen \mathbf{A}_I und \mathbf{A}_O durch quadratische Optimierung zu ermitteln, muss im QOP zunächst die Inverse \mathbf{A}_{Oinv} von \mathbf{A}_O gesucht werden. Damit lassen sich wiederum Differenzen

$$\delta_{X,i,j} = \mathbf{A}_{Oinv}^{(i)} \cdot \mathbf{t}_{WX,j} - \mathbf{A}_I^{(i)} \cdot \mathbf{t}_{AX,j} \quad \forall i = \{1, 2, 3\}, j = \{1, \dots, O\} \quad (6.25)$$

für die Datensatzpaare \mathbf{t}_{AX} und \mathbf{t}_{WX} für jede Aufnahmebeleuchtung X formulieren. In der Zielfunktion wird schließlich die Summe aller Differenzen minimiert. Für dieses QOP wird mit

$$\sum \mathbf{A}_I^{(i)} = 1 \quad \forall i = \{1, 2, 3\} \quad (6.26)$$

eine zusätzliche Nebenbedingung aufgestellt, da andernfalls das Optimum erzielt werden würde, wenn alle Koeffizientenwerte gleich Null sind. Die Nebenbedingung verhindert diesen Fall, indem sie eine eingangsseitige Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_I fordert, die den Verstärkungsfaktor 1 für jeden Farbkanal besitzt. Die ausgangsseitige Koeffizientenmatrix \mathbf{A}_O ergibt sich schließlich mit

$$\mathbf{A}_O = \mathbf{A}_{Oinv}^{-1} \quad (6.27)$$

als Inverse der optimierten Matrix \mathbf{A}_{Oinv} . Auf diese Weise lässt sich ein optimaler Kompromiss zur Abbildung von AufnahmeFarbtripeln zu korrespondierenden Wiedergabefarbtripeln für eine Reihe unterschiedlicher Beleuchtungen erzielen, indem ein optimaler Meta-Farbraum zum Weißabgleich mit nur drei Parametern berechnet wird. Zur dynamischen Ermittlung der drei Parameter auf Basis der erfassten Farbbilddaten können die nachfolgend vorgestellten Algorithmen dienen.

6.4.4 Algorithmen zur dynamischen Anpassung

Die bislang gezeigten Verfahren ermöglichen eine Optimierung der Farbkorrektur für mehrere verschiedene Beleuchtungsspektren und stellen Mechanismen zur Verfügung, um mit jeweils drei Parametern die Farbkorrektur für eine bestimmte Beleuchtung anzupassen. Zur dynamischen Nutzung dieser Mechanismen werden Algorithmen benötigt, die anhand der aufgenommenen Farbbilddaten die Parameter zur Anpassung der Farbkorrektur ermitteln. Während die Anpassungsmechanismen eher unter dem Begriff der chromatischen Adaption (*Chromatic Adaption*) behandelt werden, ist den Algorithmen zur dynamischen Anpassung der Begriff der Farbkonstanz (*Color Constancy*) zugeordnet.

Eines der einfachsten Verfahren basiert auf der Annahme, dass der mittlere Farbwert eines Bildes ein Grauwert ist (*Gray World Assumption*). Dementsprechend erfolgt ein Ausgleich aller Farbtupel eines RGB-Bildes, so dass für die Mittelwerte

$$\overline{R_{GW}} = \overline{G_{GW}} = \overline{B_{GW}} \quad (6.28)$$

gilt (GW - Gray World).

Eine andere Strategie stellt die Orientierung am Maximalwert eines Bildes dar. Es wird angenommen, dass der Maximalwert entweder eine Reflektion oder eine Remission von einem neutral weißen Objekt darstellt (WP - White Patch). Daraus folgt die Zielstellung, eine Anpassung der RGB-Farbwerte vorzunehmen, so dass

$$\max R_{WP} = \max G_{WP} = \max B_{WP} \quad (6.29)$$

gilt. Dabei sollte noch die Nebenbedingung erfüllt werden, dass der ausgewählte Maximalwert nicht bereits durch eine Sättigung des Bildaufnahmesystems verfälscht ist.

Es gibt bereits eine Reihe weiterer komplexerer Verfahren, die auf Strategien wie Gamut Mapping, neuronalen Netzen oder Korrelationstabellen beruhen. Für Details zu den Verfahren sei an dieser Stelle beispielsweise auf die Veröffentlichungen [Car00] und [BCF02] verwiesen. Einige wurden auch zum Patent angemeldet (z. B. [FCB99], [HF00]). Alle Methoden besitzen die gemeinsame Eigenschaft, dass die Analyse auf Basis von RGB-Bilddaten stattfindet und dass auch die Anpassungsmechanismen typischerweise auf RGB-Daten angewendet werden.

6.4.5 Diskussion

Es wurden drei verschiedene Verfahren zur optimalen Farbkorrektur für mehrere Aufnahmebeleuchtungen vorgestellt, die alle die Zielstellung erfüllen, mit nur drei Parametern für eine Anpassung der Farbkorrektur an die Beleuchtung sorgen zu können. Allerdings besteht bei der verallgemeinerten Diagonal-Transformation, oder auch Doppelmatrix genannt, eine starke Kopplung zwischen dem Wiedergabe- und dem Abgleichfarbraum, da die Diagonalmatrix nur wenige Freiheitsgrade zulässt. Deshalb eignet sich die Doppelmatrix vor Allem für solche Anwendungen, die prinzipiell über eine bestimmte Beleuchtungsart verfügen, dessen spektrale Strahlungsverteilung aber Fertigungstoleranzen oder Alterungsprozessen unterliegt. In diesen Fällen kann mithilfe der Diagonalmatrix eine Feinabstimmung für die Farbbildreproduktion erfolgen ohne eine optimale FarbkorrekturmatriX für jedes System berechnen zu müssen. Auf diese Weise können auch Toleranzen des gesamten Bildaufnahmesystems ausgeglichen werden. Sie eignet sich aber weniger gut für eine Reihe verschiedener Beleuchtungsarten. Deshalb soll für diesen Fall nachfolgend nur die PCA-basierte Methode mit der Triplematrix verglichen werden.

Zur Bewertung wird wiederum ein Testszenario simuliert. Dabei dient die in Kapitel 6.2.4 beschriebene Simulation als Grundlage. Diese wird im Wesentlichen dadurch erweitert, dass neben der D50 Aufnahmebeleuchtung auch für die Lichtarten D65 und D75 und die 11 Strahlungsquellen des ersten Datensatzes aus [BMFC02] korrespondierende Sätze von Farbwerttripeln t_A und t_W erzeugt werden. Damit ergeben sich jeweils 14 Datensätze für die eine optimale Farbkorrektur durch Anpassung von jeweils nur drei Parametern (c_1, c_2, c_3 bzw. d_1, d_2, d_3) erreicht werden soll. Dazu erfolgt die Anwendung der beiden Multi-Beleuchtungs-Farbkorrekturen, einerseits der PCA-basierten und andererseits der Triplematrix-Methode. Für beide Ansätze werden für die genannten Beleuchtungen optimale KorrekturmatriXen und Anpassungsparameter berechnet. Anschließend wird zum Vergleich der Verfahren der mittlere Farbabstand $\overline{\Delta E_{94}}$ für jede Beleuchtung, den jeweils entsprechenden drei Parametern und die bereits erwähnten 1995 Objektspektren berechnet. Die Ergebnisse sind Tabelle 6.2 zu entnehmen.

Ein Vergleich der beiden Verfahren zeigt, dass die Gesamtleistungsfähigkeit als ähnlich einzustufen ist. Es ist auffällig, dass bei der PCA-basierten Methode in dieser Zusammenstellung größere Schwächen in der Farbkorrektur für Leuchtstofflampen auftreten und dass dadurch eine insgesamt etwas schlechtere Güte in der Farbproduktion entsteht. Die Triplematrix-Optimierung zeigt dagegen eine gleichmäßigere Güte der Farbkorrektur für den gesamten Satz verschiedener Lichtarten und -quellen.

Unter dem Gesichtspunkt des Rechenaufwands für die Transformationsfunktion besitzt die Triplematrix auch leichte Vorteile. Während bei der Triplematrix zwei vollständige Matrizen und eine Diagonalmatrix in Serie zu berechnen sind, müssen bei der PCA-Methode vier Matrizen parallel angewendet werden. Daraus ergibt sich ein geringerer Aufwand in den notwendigen Ressourcen und Rechenleistung für die Farbbilddatenverarbeitung mit einer Triplematrix.

Methode	PCA $\overline{\Delta E_{94}}$	Triplematrix $\overline{\Delta E_{94}}$
Normlichtart D50	2,46	2,63
Normlichtart D65	2,29	2,66
Normlichtart D75	2,48	2,74
Glühlampe 1	3,26	4,27
Glühlampe 2	3,20	3,83
Glühlampe 3	3,42	3,54
Glühlampe 4	2,97	3,11
Glühlampe 1 + Rosco 3202	3,97	4,29
Glühlampe 2 + Rosco 3202	4,45	4,33
Glühlampe 3 + Rosco 3202	4,14	4,53
Glühlampe 4 + Rosco 3202	3,65	4,21
Leuchtstofflampe 1	6,32	2,55
Leuchtstofflampe 2	4,46	3,83
Leuchtstofflampe 3	6,22	2,89
Gesamt	3,81	3,53

Tabelle 6.2: Gütevergleich zweier Verfahren in der Multi-Beleuchtungs-Farbkorrektur

Abschließend ist anzumerken, dass das Prinzip der Diagonalmatrix-Parametrierung im RGB-Farbraum bei einer Triplematrix direkt durch verschiedene dynamische Anpassungsalgorithmen gesteuert werden kann und dass es im Gegensatz zum Prinzip der PCA-Methode auch eine intuitive manuelle Anpassung der drei Parameter ermöglicht.

6.5 Anwendungsspezifische Parametrierung

In diesem abschließenden Kapitel werden der Einsatz und die Ergebnisse der vorgestellten Verfahren anhand zweier Anwendungsbeispiele demonstriert. Zunächst wird am Beispiel der Dermatoskopie die Berechnung einer Farbkorrekturmatrix für ein spezielles Bildaufnahmesystem und eine konstante Lichtquelle vorgestellt. Dabei stellt der modellbasierte Ansatz eine wichtige Grundlage dar, da auf diese Weise neben einer Zusammenstellung von Standard-Objektspektren vor allem verschiedene speziell gemessene Haut-Reflexionsspektren in der Optimierung berücksichtigt werden können. Das zweite Beispiel ist eine typische Landschaftsszene. Sie dient stellvertretend für verschiedene Anwendungen im Außenbereich zur Demonstration einer dynamischen Anpassung an wechselnde Beleuchtungsbedingungen.

Die Dermatologie ist die Wissenschaft von den Hautkrankheiten (griech. *dérma* = Haut). Hautkrankheiten werden in Form von Hautveränderungen, so genannten Hautläsionen (s. Abb. 6.2), sichtbar. Unter Dermatoskopie wird die Auflichtmikroskopie bei zehnfacher Vergrößerung verstanden. Zur Befundung von Hautläsionen hat die dermatoskopische ABCD-Regel als diagnostisches Instrument weite Verbreitung gefunden. Die Regel beschreibt die Bewertung einer Hautläsion anhand der Merkmale Asymmetrie (A), Benandung (B), Farbvielfalt (C-Color) und Differentialstrukturen (D). Dabei wird den Farbeigenschaften, gegeben durch die Farbvielfalt, die Farbhomogenität und auch die farbliche Symmetrie, eine große Bedeutung zugewiesen (s. [PBH⁺00], [PBD⁺99]). Zur Unterstützung des Dermatologen bei der Befundung wurde ausgehend von einem Verbundprojekt (MELDOQ) eine Software entwickelt, die entsprechend der genannten Regel eine Bildauswertung durchführt. Um dabei die Anforderungen für eine hohe diagnostische Genauigkeit zu erreichen, ist eine reproduzierbare farbtreue Bilderfassung und damit eine gute Farbkorrektur erforderlich.



Abb. 6.2: Die Aufnahme einer Hautläsion

In der Dermatoskopie kann die mikroskopische Betrachtung über eine Lupe direkt vom Auge des Dermatologen oder indirekt über ein Farbbildaufnahme- und -wiedergabesystem erfolgen. Um Letzteres zu realisieren, wird in das Handstück, anstelle einer Lupe für das menschliche Auge, eine Optik und ein Farbbildsensor integriert. In beiden Fällen erfolgt die Beleuchtung des Objekts, der Hautläsion, durch ein Ringlicht mit weiß leuchtenden LEDs. Als Zielfarbraum für die Eingangsbilddaten der angesprochenen Bildverarbeitungssoftware wird der standardisierte Farbraum sRGB, der im Bereich der Computergrafik vielfach Anwendung findet, festgelegt (s. a. Kap. 3.1.2). Auf Basis einer spektralen Charakterisierung des Bildaufnahmesystems mit den in dieser Arbeit vorgestellten Methoden und einer spektroradiometrischen Messung der LED-Beleuchtung kann schließlich eine Optimierung der Farbkorrektur erfolgen.

Zur Ermittlung einer optimalen Farbkorrekturmatrix wird die Basismethode der quadratischen

Optimierung aus Kapitel 6.2.3 verwendet und durch das Kriterium der empfindungsgemäßen Optimierung der Rauschübertragung aus Kapitel 6.3.3 erweitert. Diese wird nur mit einem geringen Gewichtungsfaktor ω_{noise} in der Optimierung berücksichtigt, da in dieser Anwendung immer für eine ausreichende Lichtintensität gesorgt ist, so dass ein Bilddatenrauschen kaum in Erscheinung tritt. Dagegen sind möglichst geringe Farbabweichungen von großer Bedeutung, um eine sichere Diagnose für die Hautläsion zu erstellen. Die Optimierungsmethode liefert die 9 Matrixkoeffizienten

$$\mathbf{A}_{dermo} = \begin{bmatrix} 3,09 & -0,24 & -0,17 \\ -0,28 & 1,32 & -0,14 \\ 0,15 & -0,45 & 1,03 \end{bmatrix} \quad (6.30)$$

zur Transformation der Farbwerttripel \mathbf{t}_A des Bildaufnahmesystems zu denen der Wiedergabe im sRGB-Farbraum. Die Abbildung 6.3 zeigt einen Vergleich der Zielfarbwerttripel im Wiedergabefarbraum \mathbf{t}_W (Berechnung entsprechend Beziehung (3.8)) mit den durch Transformation nach $\mathbf{A}_{dermo} \cdot \mathbf{t}_A$ reproduzierten Tripeln für das verwendete Bildaufnahmesystem und die LED-Beleuchtung.

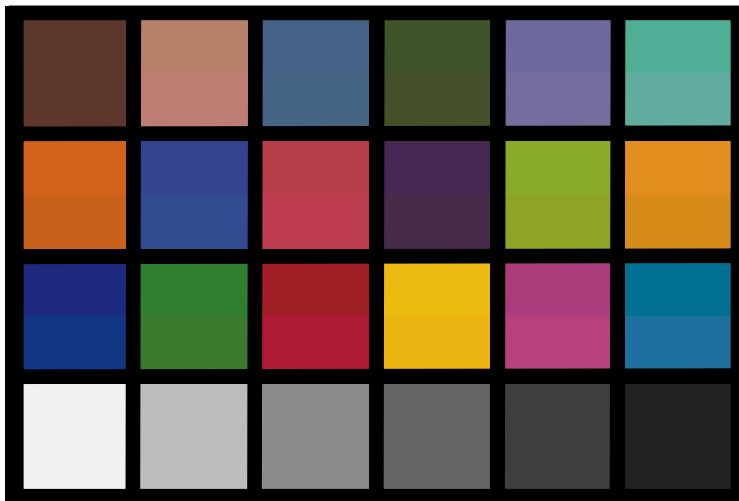


Abbildung 6.3: Dermatoskopie: Die Referenzdaten des Macbeth ColorChecker im Wiedergabefarbraum sRGB (jeweils obere Hälfte) im Vergleich mit den transformierten Aufnahme Farbwerttripeln (jeweils untere Hälfte)

Abschließend erfolgt eine Bewertung der Farbproduktionsgüte für die 1995 Objektspektren aus [BMFC02], die mit $\overline{\Delta E}_{94} = 3,23$ und $\Delta E_{94,max} = 9,48$ beziffert werden kann.

Als zweites Anwendungsbeispiel wird eine typische Landschaftsszene unter Tageslichtbedingungen betrachtet. Diese soll stellvertretend für eine große Anzahl von Anwendungen im Außenbereich stehen, bei denen Beleuchtungsänderungen sowohl über den Tag als auch über das Jahr auftreten. Zur Farbkorrektur kommt die Triplematrix-Methode (vgl. Kap. 6.4.3) zum Einsatz. Um optimale Koeffizienten für die Matrizen \mathbf{A}_I und \mathbf{A}_O zu berechnen, erfolgt zunächst eine Simulation wie in Kapitel 6.4.5. Dabei werden die Normlichtarten für Tageslicht bei ähnlichsten Farbtemperaturen von 4000 K, 5000 K (D50), 6500 K (D65), 7500 K (D75) und 9300 K berücksichtigt und als Wiedergabefarbraum wird wiederum sRGB festgelegt. Für diese fünf Lichtarten werden korrespondierende Sätze von Farbwerttripeln t_A und t_W erzeugt. Die Optimierungsmethode liefert neben den Matrizen \mathbf{A}_I und \mathbf{A}_O die Parameter d_1 , d_2 und d_3 als Koeffizienten der Diagonalmatrix für jede Beleuchtung.

Die Simulation basiert auf den in Kapitel 5.2 vorgestellten Messergebnissen zur spektralen Empfindlichkeit des Bildaufnahmesystems einer Farbkamera vom Typ DXc100 mit der in dieser Arbeit entwickelten indirekten Messmethode. Mit dieser Kamera erfolgte die Aufnahme einer typischen Landschaftsszene an einem sonnigen Morgen und am bewölkten Mittag des selben Tages im Monat Juni. Die Farbbilddaten, die das Bildaufnahmesystem jeweils lieferte, sind in Abbildung 6.4 dargestellt. An diesen Farbdaten im AufnahmeFarbraum lässt sich erkennen, dass die Farbsättigung sehr gering ausfällt und dass auch die Farbtöne nicht der Wahrnehmung eines menschlichen Beobachters entsprechen.

Die Anwendung der Farbkorrektur unter Nutzung des in Kapitel 6.4.4 vorgestellten White-Patch-Algorithmus führt zu den in Abbildung 6.5 gezeigten korrigierten Farbbilddaten. Dabei wurden die Diagonalmatrizen

$$\mathbf{D}_{Morgen} = \begin{bmatrix} 1,96 & 0 & 0 \\ 0 & 1,02 & 0 \\ 0 & 0 & 1,12 \end{bmatrix}, \mathbf{D}_{Mittag} = \begin{bmatrix} 2,10 & 0 & 0 \\ 0 & 1,01 & 0 \\ 0 & 0 & 1,04 \end{bmatrix} \quad (6.31)$$

ermittelt. Im Vergleich dazu lieferte die Optimierung die Matrizen

$$\mathbf{D}_{D50} = \begin{bmatrix} 1,77 & 0 & 0 \\ 0 & 0,99 & 0 \\ 0 & 0 & 1,20 \end{bmatrix}, \mathbf{D}_{D65} = \begin{bmatrix} 2,11 & 0 & 0 \\ 0 & 1,00 & 0 \\ 0 & 0 & 1,00 \end{bmatrix} \quad (6.32)$$

für die Normlichtarten D50 und D65. Die Resultate zeigen, dass die Simulation mit den zu Grunde gelegten Daten der indirekten Messung und den Normlichtarten sehr praxisnahe Ergebnisse liefert. Zwischen dem Optimierungsergebnis für das Tageslichtspektrum D65, das typisch für die bei diesem Test vorherrschenden Bedingungen ist, und den aus der realen Szene ermittelten Werten bestehen nur geringfügige Unterschiede. Für die Aufnahme am Morgen ergibt sich eine Verschiebung der Koeffizienten in Richtung einer geringeren Farbtemperatur des Tageslichtspektrums. Auch dieses Ergebnis zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Erwartungen.



Abbildung 6.4: Eine Landschaftsszene am sonnigen Morgen (a) und bewölkten Mittag (b) vom Bildaufnahmesystem einer Kamera vom Typ Kappa DXc100

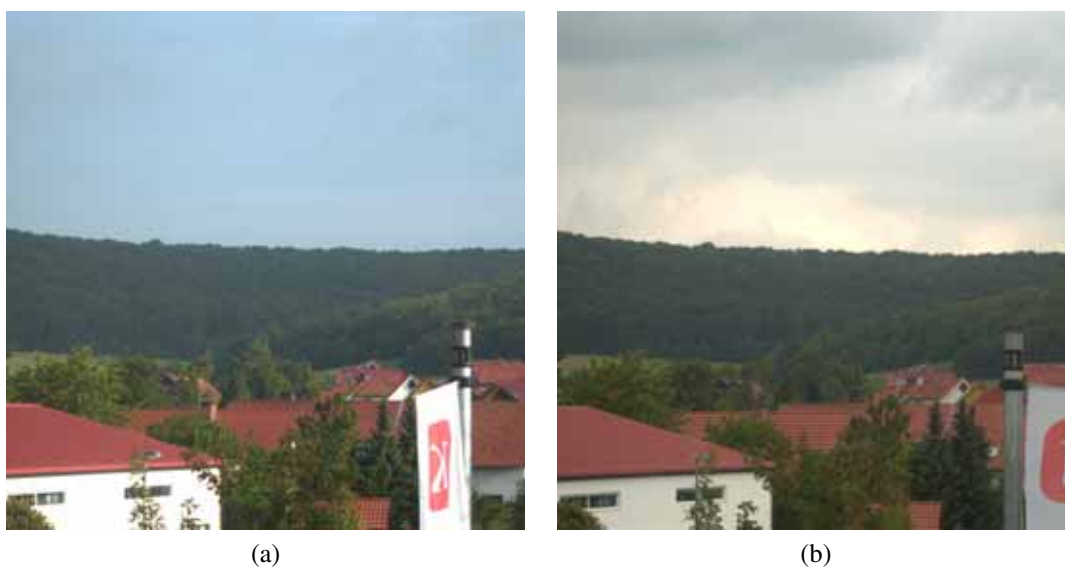


Abbildung 6.5: Eine Landschaftsszene am sonnigen Morgen (a) und bewölkten Mittag (b) mit einer Kamera vom Typ Kappa DXc100 nach der Farbkorrektur (Farbwiedergabe angepasst für sRGB)

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit eines Farbbildaufnahmesystems, beispielsweise einer digitalen Kamera, ist eine wichtige Voraussetzung für die modellbasierte Anpassung der Farbkorrekturmechanismen an die Beleuchtungsbedingungen in speziellen Anwendungen oder zur Generierung von Geräteprofilen für ein Farbmanagementsystem.

In dieser Arbeit wurde ein Verfahren zur indirekten Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit entwickelt, in die Praxis umgesetzt und untersucht. Das indirekte Verfahren benötigt im Vergleich zum direkten aufwendigere mathematische Methoden zur Ermittlung der Empfindlichkeit. Es besitzt aber die Vorteile, dass die verwendeten breitbandigen Farbproben zu einer vergleichsweise höheren Strahlungsleistung am Bildsensor führen, dass diese Proben eher den im praktischen Einsatz auftretenden Bedingungen entsprechen und dass das Verfahren in der Umsetzung wesentlich kostengünstiger ist. Im Rahmen der Verfahrensentwicklung wurden verschiedene Methoden zur Spektralschätzung untersucht und Erweiterungen zu der bevorzugten Methode der quadratischen Optimierung präsentiert. Ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung des indirekten Messverfahrens liegt in der neuen Methode zur automatischen Selektion der für das Verfahren am besten geeigneten Farbproben. Dieser als Lagrange-Multiplikator-Methode benannte Ansatz zur Selektion basiert auf einer analytischen Untersuchung des quadratischen Optimierungsproblems und liefert einen optimalen Probensatz für die gewählte Messaufgabe.

Ein weiterer Kernpunkt der Arbeit bestand in der Entwicklung und Umsetzung eines speziellen Farbkameramessplatzes, der durch einen präzisen und stabilen optischen Aufbau die reproduzierbare Erfassung der Farbprobenspektren und der entsprechenden Kamerareaktionen ermöglicht. Der kompakte Messaufbau erlaubt die Adaption verschiedener Kameras und ermöglicht eine schnelle Datenerfassung für die indirekte Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit. Die Ergebnisse des indirekten Verfahrens wurden denen eines direkten Verfahrens, der von Krüger entwickelten Spektrometermethode, gegenübergestellt. Die beiden Ergebnisse weisen eine sehr hohe Ähnlichkeit auf und können im Rahmen der Messungenauigkeit, die unter anderem der spektralen Kalibrierung der unterschiedlichen Messinstrumente zuzuschreiben ist, als identisch betrachtet werden. Eine weitere Bestätigung der Ergebnisgüte wurde durch einen Vergleich basierend auf einem Testfarbprobensatz geliefert. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich auf Basis der indirekten Messergebnisse die realen Kamerareaktionen auf den Testfarbprobensatz mit einer durchschnittlichen Abweichung weniger Promille vorhersagen lassen. Die gezeigten Resultate qualifizierten das entwickelte indirekte Messverfahren zum Einsatz in der täglichen Praxis. Dabei ließ sich der zusätzliche Vorteil eines geringen Kalibrieraufwands nachweisen.

Als dritter Kernpunkt wurden neue Methoden zur modellbasierten Optimierung von Farbkorrektur-Transformationen entwickelt und bisherigen Ansätzen aus der Literatur gegenübergestellt. Dazu wurde unter Nutzung der indirekt bestimmten Empfindlichkeiten ein spektrales Modell erarbeitet, welches zur Optimierung der Farbkorrektur dient. Der modellbasierte Ansatz erlaubt eine hohe Flexibilität in der Berücksichtigung realer Lichtquellen, definierter Normlichtarten, Testkarten, vermessener realer und generierter virtueller Objektspektren zur optimalen Anpassung der Farbproduktion unter bestimmten Anwendungsbedingungen. Um neben der Farbtreue auch die Wirkung einer Transformation auf das Signal-Rausch-Verhältnis in den Bilddaten zu optimieren, wurde ein neuer Ansatz zur Integration einer empfindungsgemäßen Bewertung des Rauschens in die quadratische Optimierung präsentiert. Des Weiteren wurde eine neue Methode zur optimalen Farbkorrektur für mehrere und variierende Aufnahmebeleuchtungen vorgestellt. Der als Triplematrix bezeichnete Ansatz basiert auf der Idee, für mehrere Beleuchtungen einen gemeinsamen optimalen Farbraum für einen Weißabgleich zu ermitteln, in welchem eine Anpassung durch die drei Koeffizienten einer Diagonalmatrix realisiert wird. Zur dynamischen Anpassung der Farbkorrektur, einem automatischen Weißabgleich, lässt sich die Triplematrix in direkter Verbindung mit verschiedenen veröffentlichten Farbkonstanzalgorithmen nutzen.

Während in dieser Arbeit das indirekte Verfahren zur Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit nur für Kameras mit CCD-Bildsensoren untersucht wurde, könnten weiterführende Arbeiten die Methoden an Kameras mit CMOS-Bildsensoren verproben. Außerdem wäre es für verschiedene weitere modellbasierte Betrachtungen wünschenswert, das Verfahren auf den Spektralbereich von etwa 300 bis 1100 nm zu erweitern. Diese Erweiterung würde die spektrale Charakterisierung von vielen monochromen Bildsensoren und Farbbildsensoren ohne eine Sperrung des NIR-Bereichs ermöglichen und somit weitere Perspektiven für simulationsbasierte Optimierungen schaffen, um die spektrale Charakteristik dieser Sensoren für verschiedene Anwendungszwecke in der Bildfassung, Objekterkennung sowie in der orts aufgelösten Messtechnik optimal anpassen zu können.

Literaturverzeichnis

- [Bar99] BARNARD, Kobus: *Practical Colour Constancy*. School of Computing Science, Simon Fraser University, PhD thesis, 1999
- [Bay76] BAYER, Bryce E.: *Color imaging array*. United States Patent 3,971,065, Eastman Kodak Company, 1976
- [BB97] BURNS, P. D. ; BERNS, R. S.: Error Propagation Analysis in Color Measurement and Imaging. In: *Color Research and Application* 22 (1997), Nr. 4, S. 280–289
- [BBB06] BOBEY, K. ; BÜTTNER, C. ; BURDICK, R.: Digital-Kamera mit Echtzeit-Farbmanagement für medizinische Anwendungen. HAWK - FH Hildesheim/Holzminen/Göttingen, Fak. NT, 2006. – Abschlussbericht zum EFRE-Projekt Nr. 2003.129
- [BBS05] BÜTTNER, C. ; BOBEY, K. ; SCHLICHTING, B.: Parametrierung digitaler Farbkameras auf Basis einer spektralen Charakterisierung. In: *11. Workshop Farbbildverarbeitung*. GFaI, Berlin, 2005
- [BBS06] BÜTTNER, C. ; BOBEY, K. ; SCHLICHTING, B.: Spectral Sensitivity Estimation of Digital Cameras, 2006 (Proc. IS&T/SID 3rd European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision), S. 70–74
- [BCF02] BARNARD, K. ; CARDEI, V. ; FUNT, B.: A Comparison of Computational Color Constancy Algorithms - Part I: Methodology and Experiments With Synthesized Data. In: *IEEE Transactions on Image Processing* 11 (2002), Nr. 9, S. 972–983
- [BF02] BARNARD, K. ; FUNT, B.: Camera Characterization for Color Research. In: *Color Research and Application* 27 (2002), Nr. 3, S. 153–164
- [BKB06] BURDICK, R. ; KRÜGER, U. ; BOBEY, K.: Verhalten von Farbproben mit Hochleistungs-Leuchtdioden. In: *12. Workshop Farbbildverarbeitung*. Ilmenau, 2006
- [BMFC02] BARNARD, K. ; MARTIN, L. ; FUNT, B. ; COATH, A.: A data set for color research. In: *Color Research and Application* 27 (2002), Nr. 3, S. 147–151. – http://www.cs.sfu.ca/~colour/data/colour_constancy_synthetic_test_data/index.html

- [BS93] BILLMEYER, Fred W. ; SALTZMAN, Max: *Grundlagen der Farbtechnologie - 2. Aufl.* Muster-Schmidt, 1993. – Dt. Ausgabe von *Principles of Color Technology - 2nd ed.*, John Wiley & Sons, 1981
- [BT06] BERNS, R. S. ; TAPLIN, L. A.: *Practical Spectral imaging Using a Color-Filter Array Digital Camera*. MCSL (RIT) Technical Report, 2006. <http://www.art-si.org>
- [BTNM05] BERNS, R. S. ; TAPLIN, L. A. ; NEZAMABADI, M. ; MOHAMMADI, M.: Spectral Imaging using a commercial color-filter array digital camera. In: *Proc. ICOM Committee for Conservation 14th Triennial Meeting*. Den Haag (Niederlande), 2005, S. 743–750
- [Bür02] BÜRING, Hendrik: Eigenschaften des Farbraumes nach DIN 6176 (DIN99-Formel) und seine Bedeutung für die industrielle Anwendung. In: *8. Workshop Farbbildverarbeitung*. Ilmenau, 2002
- [Car00] CARDEI, Vlad C.: *A Neural Network Approach to Colour Constancy*. School of Computing Science, Simon Fraser University, PhD thesis, 2000
- [CWCR04] CHEUNG, V. ; WESTLAND, S. ; CONNAH, D. ; RIPAMONTI, C.: A comparative study of the characterization of colour cameras by means of neural networks and polynomial transforms. In: *Journal of Coloration Technology* 120 (2004), Nr. 1, S. 19–25
- [CWL⁺05] CHEUNG, V. ; WESTLAND, S. ; LI, C. ; HARDEBERG, J. ; CONNAH, D.: Characterization of trichromatic color cameras by using a new multispectral imaging technique. In: *Optical Society of America Journal* 22 (2005), Nr. 7, S. 1231–1240
- [CWT04] CHEUNG, V. ; WESTLAND, S. ; THOMSON, M.: Accurate Estimation of the Nonlinearity of Input/Output Response for Color Cameras. In: *Color Research and Application* 29 (2004), Nr. 3, S. 406–412
- [DIN76] DIN5033T6: *DIN 5033: Farbmessung, Teil 6: Dreibereichsverfahren*. Deutsches Institut für Normung e.V., 1976
- [DIN79] DIN5033T1: *DIN 5033: Farbmessung, Teil 1: Grundbegriffe der Farbmetrik*. Deutsches Institut für Normung e.V., 1979
- [DIN82a] DIN5031T1: *DIN 5031: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Teil 1: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Strahlungsphysik*. Deutsches Institut für Normung e.V., 1982

- [DIN82b] DIN5031T3: *DIN 5031: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik, Teil 3: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik*. Deutsches Institut für Normung e.V., 1982
- [DIN85] DIN5032T6: *DIN 5032: Lichtmessung, Teil 6: Photometer - Begriffe, Eigenschaften und deren Kennzeichnung*. Deutsches Institut für Normung e.V., 1985
- [DIN92] DIN5033T2: *DIN 5033: Farbmessung, Teil 2: Normvalenz-Systeme*. Deutsches Institut für Normung e.V., 1992
- [DIN04] DIN EN 13032-1: *DIN EN 13032: Licht und Beleuchtung - Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten, Teil 1: Messung und Datenformat*. Deutsches Institut für Normung e.V., 2004. – Deutsche Fassung EN 13032-1:2004
- [DMT04] DICARLO, J. M. ; MONTGOMERY, E. ; TROVINGER, S. W.: Emissive Chart for Imager Calibration. In: *Proc. IS&T/SID 12th Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, Applications*, 2004, S. 295–301
- [Eas07] EASTMAN KODAK COMPANY: *KAI-1020 Image Sensor - 1000(H) x 1000(V) Pixel Interline Transfer Progressive Scan CCD, Revision 5.0 MTD/PS-0205*, 2007
- [EMV05] *EMVA Standard 1288 - Standard for Characterization and Presentation of Specification Data for Image Sensors and Cameras, Release A1.00*. European Machine Vision Association, 2005
- [EMV06] *EMVA Standard 1288 - Standard for Characterization and Presentation of Specification Data for Image Sensors and Cameras: Linearity and Linearity Error, Preliminary Release Rev. A0.1*. European Machine Vision Association, 2006
- [Fai05] FAIRCHILD, Mark D.: *Color Appearance Models*. 2. John Wiley & Sons, 2005
- [FCB99] FUNT, B. V. ; CARDEI, V. C. ; BARNARD, J. J.: *Method of estimating chromaticity of illumination using neural networks*. United States Patent 5,907,629, 1999
- [FD97a] FINLAYSON, G. D. ; DREW, M. S.: Constrained least-squares regression in color spaces. In: *Journal of Electronic Imaging* 6 (1997), Nr. 4, S. 484–493
- [FD97b] FINLAYSON, G. D. ; DREW, M. S.: White-point preserving color correction. In: *Proc. IS&T/SID Fifth Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications*, 1997
- [FD99] FINLAYSON, G. D. ; DREW, M. S.: Positive Bradford Curves through Sharpening. In: *Proc. IS&T/SID Seventh Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications*, 1999, S. 227–232

- [FDF93] FINLAYSON, G.D. ; DREW, M.S. ; FUNT, B.V.: Diagonal Transforms Suffice for Color Constancy. In: *Proc. Int. Conference on Computer Vision 1993*, 1993, S. 164–171
- [FDF94] FINLAYSON, G. D. ; DREW, M. S. ; FUNT, B. V.: Color Constancy: generalized diagonal transforms suffice. In: *Journal of the Optical Society of America* 11 (1994), Nr. 11, S. 3011–3019
- [FHH98] FINLAYSON, G. D. ; HORDLEY, S. ; HUBEL, P. M.: Recovering Device Sensitivities with Quadratic Programming. In: *Proc. IS&T/SID 6th Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications*, 1998, S. 90–95
- [FJ03a] FUNT, B. ; JIANG, H.: Non-Diagonal Color Correction. In: *Proc. International Conference on Image Processing*, 2003
- [FJ03b] FUNT, B. ; JIANG, H.: Non-von-Kries 3-Parameter Color Prediction. In: *Proc. SPIE Human Vision and Electronic Imaging VIII*, 2003
- [FJG⁺03] FRANKE, K.-H. ; JAHN, R. ; GRUNERT, F. ; KRUMBEIN, F. ; SIESS, G.: True Colour mit JENCOLOUR XYZ-Farbsensoren. In: *9. Workshop Farbbildverarbeitung. Ostfildern-Nellingen*, 2003
- [FS01] FINLAYSON, G. D. ; SCHAEFER, G.: Solving for Colour Constancy using a Constrained Dichromatic Reflection Model. In: *International Journal of Computer Vision* 42 (2001), Nr. 3, S. 127–144
- [FS02] FINLAYSON, G. D. ; SÜSTRUNK, S.: Color Ratios and Chromatic Adaptation, 2002 (Proc. IS&T/SID 1st European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision), S. 7–10
- [GBF⁺06] GROOM, D. E. ; BEBEK, C. J. ; FABRICIUS, M. ; KARCHER, A. ; KOLBE, W. F. ; ROE, N. A. ; STECKERT, J.: Quantum efficiency characterization of LBNL CCDs: Part 1. The Quantum Efficiency Machine, 2006 (Proc. SPIE 6068, Sensors, Cameras, and Systems for Scientific/Industrial Applications VII), S. 101–111
- [Gig98] GIGAHERTZ-OPTIK GMBH: *Kalibrierschein für U-Kugel mit Quarzhalogenleuchte - Typ BN-9701 - Seriennummer 974421*, 1998
- [Häf01] HÄFLIGER, Jürg: *A High-Resolution Digital Imaging System with Enhanced Color Reproduction for Use in Medical Applications*. Institut für Integrierte Systeme (IIS), ETH Zürich, Dissertation, 2001
- [HBS98] HARDEBERG, J. Y. ; BRETTEL, H. ; SCHMITT, F.: Spectral Characterisation of Electronic Cameras. In: *Proc. SPIE Electronic Imaging: Processing, Printing, and Publishing in Color*, 1998, S. 100–109

- [Hel06] HELLING, Stephan: Improvement of Multispectral Image Capture by Compensating for Stray Light, 2006 (Proc. IS&T/SID 3rd European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision), S. 458–462
- [HF00] HUBEL, P. M. ; FINLAYSON, G.: *White point determination using correlation matrix memory*. United States Patent 6,038,339, Hewlett-Packard Company, 2000
- [HH92] HÄMMERLIN, G. ; HOFFMANN, K.-H.: *Numerische Mathematik*. Springer-Verlag, 1992
- [HHFD97] HUBEL, P. M. ; HOLM, J. ; FINLAYSON, G. D. ; DREW, M. S.: Matrix Calculations for Digital Photography. In: *Proc. IS&T/SID Fifth Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications*, 1997, S. 105–111
- [Hol98] HOLST, Gerald C.: *CCD Arrays, Cameras and Displays. 2.* JCD Publishing, 1998
- [HSB00] HARDEBERG, J. ; SCHMITT, F. ; BRETTEL, H.: Multispectral image capture using a tunable filter. In: *Proc. SPIE Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hardcopy, and Graphic Arts V*, 2000, S. 77–88
- [Hun93] HUNG, Po-Chieh: Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up-table model and interpolations. In: *Journal of Electronic Imaging* 2 (1993), Nr. 1, S. 53–61
- [Hun04] HUNT, Robert W. G.: *The Reproduction of Colour. 6.* John Wiley & Sons, 2004
- [ICC06] ICC.1:2004-10: *Specification ICC.1:2004-10 (Profile version 4.2.0.0) Image technology colour management - Architecture, profile format, and data structure*. International Color Consortium, 2006
- [IEC99] IEC 61966-2-1: *Multimedia systems and equipment - Colour measurement and management - Part 2-1: Colour management - Default RGB colour space - sRGB*. International Electrotechnical Commission, 1999
- [Jan01] JANESICK, James R.: *Scientific Charge-Coupled Devices*. SPIE Press, 2001
- [Kön01] KÖNIG, Friedhelm: *Die Charakterisierung von Farbsensoren*. Fakultät ET & IT, RWTH Aachen, Dissertation, 2001
- [Krü04] KRÜGER, Udo: *Ausgewählte Aspekte der orts aufgelösten Erfassung stationärer Licht- und Farbverteilungen*. Fakultät E/I, TU Ilmenau, Dissertation, 2004
- [KS02] KRÜGER, U. ; SCHMIDT, F.: Ortsaufgelöste Farbmessung - Aspekte eines Filterrad-designs. In: *8. Workshop Farbbildverarbeitung*. Ilmenau, 2002

- [LL96] LENZ, R. ; LENZ, U.: MARC project: colorimetric acquisition and printing of paintings with 20,000X20,000 pixels with an electronic camera. In: *Proc. SPIE on Advanced Focal Plane Arrays and Electronic Cameras*, 1996, S. 325–332
- [LR99] LUO, M. R. ; RHODES, P. A.: Corresponding colour datasets. In: *Color Research and Application* 24 (1999), Nr. 4
- [Lut27] LUTHER, R.: Aus dem Gebiet der Farbreizmetrik. In: *Zeitschrift für technische Physik* 12, 1927, S. 540–558
- [Mer99] MERRILL, R. B.: *Color separation in an active pixel cell imaging array using a triple-well structure*. United States Patent 5,965,875, Foveon, Inc., 1999
- [MFH⁺02] MORONEY, N. ; FAIRCHILD, M. D. ; HUNT, R. W. G. ; LI, C. ; LUO, M. R. ; NEWMAN, T.: The CIECAM02 Color Appearance Model. In: *Proc. IS&T/SID Tenth Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications*, 2002, S. 23–27
- [Mor97] MORGENEIER, Dirk: Untersuchungen zur Erhöhung der Farbauflösung von Ein-Chip-CCD-Farbkameras. TU Ilmenau, Fakultät E/I, ATE, 1997. – Belegarbeit
- [Mün06] MÜNZENMAYER, Christian: Spektrale Farbkorrektur mittels linearer Schätzverfahren. In: *12. Workshop Farbbildverarbeitung*. Ilmenau, 2006
- [O⁺96] OCHI, Shigeyuki u. a.: Charge-Coupled Device Technology. In: IKOMA, Toshiaki (Hrsg.) ; University of Tokyo (Veranst.): *Section A: Electronics, Vol. 30*. Tokyo : Gordon and Breach Publishers, 1996 (Japanese Technology Reviews)
- [Oce03] OCEAN OPTICS BV: *HL-2000-CAL Lamp Calibration - HL-2000-CAL Lamp Serial Number 200249*, 2003
- [Oku05] OKUMURA, Yoshio: Developing a Spectral and Colorimetric Database of Artist Paint Materials. College of Science, 2005. – Master of Science Arbeit
- [Opf94] OPFER, Gerhard: *Numerische Mathematik für Anfänger*. Vieweg, 1994
- [Pas03] PASCALE, Danny: *RGB coordinates of the Macbeth ColorChecker*. The BabelColor Company, 2003
- [PBD⁺99] POMPL, R. ; BUNK, W. ; DERSCH, D. R. ; HORSCH, A. ; STOLZ, W. ; ABMAYR, W. ; BRAUER, W. ; GLÄSSL, A. ; SCHIFFNER, R. ; MORFILL, G.: Charakterisierung der Farbeigenschaften melanozytärer Hautveränderungen zur Unterstützung der Früherkennung des malignen Melanoms. In: *Bildverarbeitung für die Medizin 1999*, Springer-Verlag, 1999, S. 160–164

- [PBH⁺00] POMPL, R. ; BUNK, W. ; HORSCH, A. ; STOLZ, W. ; ABMAYR, W. ; BRAUER, W. ; GLÄSSL, A. ; MORFILL, G.: MELDOQ: Ein System zur Unterstützung der Früherkennung des malignen Melanoms durch digitale Bildverarbeitung. In: *Bildverarbeitung für die Medizin 2000*, Springer-Verlag, 2000, S. 234–238
- [PCO05] PCO AG: *knowledge base: linearity*, 2005. [http://www.pco.de. – pco_cooKe_kb_linearity_0502.pdf](http://www.pco.de/~pco_cooKe_kb_linearity_0502.pdf)
- [PHI⁺04] PAULUS, D. ; HONG, V. ; IDLER, C. ; HORNEGGER, J. ; CSINK, L.: Sensitivity Curve Approximation using linear Algebra, 2004 (Proc. IS&T/SID 2nd European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision), S. 207–212
- [Poy96] POYNTON, Charles A.: *A Technical Introduction to Digital Video*. John Wiley & Sons, 1996
- [Qua02] QUAN, Shuxue: *Evaluation and optimal design of spectral sensitivities for digital color imaging*. College of Science, Rochester Institute of Technology, PhD thesis, 2002
- [Rec95] *Parameter Values for the HDTV Standards for Production and International Programme Exchange*. Recommendation ITU-R BT.709-2, 1995
- [Ric76] RICHTER, Manfred: *Einführung in die Farbmeterik*. Walter de Gruyter, 1976
- [Sch99] SCHMIDT, Franz: *Systemtechnik der Bildverarbeitung*. TU Ilmenau, Fakultät E/I, ATE, 1999. – Vorlesungsskript
- [Sch00] SCHMIDT, Werner: *Optische Spektroskopie - 2. Aufl.* WILEY-VCH, 2000
- [SCH04] SCHOTT AG: *Optische Glasfilter - Kalkulationsprogramm*, 2004
- [SF02] SILVESTRINI, Narciso ; FISCHER, Ernst P.: *Farbsysteme in Kunst und Wissenschaft*. DuMont, 2002
- [SF05] SÜSSTRUNK, S. ; FINLAYSON, G. D.: Evaluating Chromatic Adaptation Transform Performance. In: *Proc. IS&T/SID Thirteenth Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications*, 2005, S. 227–232
- [SHF01] SÜSSTRUNK, S. ; HOLM, J. ; FINLAYSON, G. D.: Chromatic Adaptation Performance of Different RGB Sensors. In: *IS&T/SPIE Electronic Imaging, SPIE Vol. 4300* (2001)
- [SK99] SCHMIDT, F. ; KRÜGER, U.: Einsatz von Standard-CCD-Matrizen für fotometrische Messungen - Anwendung und Design von Kameras mit hoher Auflösung und Genauigkeit. In: *Framos CCD-Forum*. München, 1999

- [Son98] SONY CORPORATION: *ILX511 - 2048-pixel CCD Linear Image Sensor (B/W)*, 1998
- [Spe03] SPECTRAL IMAGING LTD.: *ImSpector: imaging spectrograph user manual, Version 2.21*, 2003
- [ST93] SHARMA, G. ; TRUSSELL, H. J.: Characterization of Scanner Sensitivity. In: *Proc. IS&T/SID Color Imaging Conference: Transforms & Transportability of Color*, 1993, S. 103–107
- [ST96] SHARMA, G. ; TRUSSELL, H. J.: Measures of Goodness for Color Scanners. In: *Proc. IS&T/SID 4th Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications*, 1996, S. 28–32
- [ST97] SHARMA, G. ; TRUSSELL, H. J.: Figures of Merit for Color Scanners. In: *IEEE Transactions on Image Processing* 6 (1997), Nr. 7, S. 990–1001
- [SWD04] SHARMA, G. ; WU, W. ; DALAL, E. N.: The CIEDE2000 Color-Difference Formula: Implementation Notes, Supplementary Test Data, and Mathematical Observations. In: *Color Research and Application* 30 (2004), Nr. 1, S. 21–30
- [The95] THEUWISSEN, Albert J. P.: *Solid-State Imaging with Charge-Coupled Devices*. Kluwer Academic Publishers, 1995
- [TSCR96] TRUSSELL, H. J. ; SHARMA, G. ; CHEN, P. ; RAJALA, S. A.: Comparison of Measures of Goodness of Sets of Color Scanning Filters. In: *Proc. IEEE 9th Multi-dimensional Signal Processing Workshop*, 1996
- [Uni06] UNIVERSITY OF JOENSUU COLOR GROUP: *Spectral Database*. <http://spectral.joensuu.fi/>, 2006
- [VFTB97a] VORA, P. L. ; FARRELL, J. E. ; TIETZ, J. D. ; BRAINARD, D. H.: *Digital color cameras - 1 - Response models*. Hewlett-Packard Laboratories, 1997. <http://www.hpl.hp.com/techreports/97/HPL-97-53.html>
- [VFTB97b] VORA, P. L. ; FARRELL, J. E. ; TIETZ, J. D. ; BRAINARD, D. H.: *Digital color cameras - 2 - Spectral response*. Hewlett-Packard Laboratories, 1997. <http://www.hpl.hp.com/techreports/97/HPL-97-54.html>
- [VT98] VRHEL, M. J. ; TRUSSELL, H. J.: Color Device Calibration: A Mathematical Formulation. In: *IEEE Transactions on Image Processing* 8 (1998), Nr. 12, S. 1796–1806
- [WR04] WESTLAND, Stephen ; RIPAMONTI, Caterina: *Computational Colour Science using MATLAB*. John Wiley & Sons, 2004
- [WS82] WYSZECKI, Günter ; STILES, W. S.: *Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae*. 2. John Wiley & Sons, 1982

- [XDCW02] XIAO, F. ; DICARLO, J. M. ; CATRYSSSE, P. B. ; WANDELL, B. A.: High Dynamic Range Imaging of Natural Scenes. In: *Proc. IS&T/SID 10th Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, Applications*, 2002, S. 337–342
- [Zha97] ZHANG, Yin: Solving Large-Scale Linear Programs by Interior-Point Methods Under the MATLAB Environment / Department of Computational and Applied Mathematics, Rice University. Houston, Texas, 1997. – Technical Report

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass

- ich die vorliegende Dissertationsschrift „Spektrale Charakterisierung von Farbbildsensoren zur anwendungsspezifischen Kameraparametrierung“ selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe,
- ich mich nicht bereits anderwärts um einen Doktorgrad beworben habe oder einen solchen besitze,
- mir die Promotionsordnung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II der Humboldt-Universität zu Berlin (veröffentlicht im Amtlichen Mitteilungsblatt Nr. 34/2006) bekannt ist.

Wiesbaden, 9. September 2007

