

# 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.

## 1.2 Einordnung und Ziel

Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Entwicklung und Untersuchung von Verfahren zur schnellen und flexiblen Anpassung von Farbkameras an unterschiedliche Anforderungen in den Aufnahme- und Wiedergabebedingungen, um einem menschlichen Betrachter jeweils einen optimalen, originalgetreuen Bildeindruck zu vermitteln. Zur Veranschaulichung der zu Grunde gelegten Gegebenheiten, ist in Abbildung 1.1 der Aufbau eines technischen Sehsystems modellhaft dargestellt. Im Signalweg befindet sich von links beginnend eine Beleuchtung für die Bildaufnahme, eine aus Objekten bestehende Szene, hier durch eine Testkarte symbolisiert, eine Farbkamera als Bildaufnahme- und auch Bildverarbeitungssystem, ein Gerät zur Bildwiedergabe und schließlich ein Betrachter, der unter den Wiedergabebedingungen den gleichen Bildeindruck erwartet, den er auch bei direkter Betrachtung des Aufnahmeoriginals bekommen hätte. Die Farbkamera stellt hier die anpassbare Größe zwischen Aufnahme und Wiedergabe dar. Die Anpassung kann an zwei Eingriffspunkten erfolgen, durch optische Filterung zur Veränderung der spektralen Empfindlichkeit und durch Optimierung der Signalverarbeitung, hier in einem FPGA<sup>1</sup> (in Abb. 1.1 gelb hervorgehoben). Auf Basis dieses Modells, welches die Komponenten der betrachteten Systeme physikalisch beschreibt, soll schließlich eine optimale Anpassung durch Parametrierung der Kamera erreicht werden.

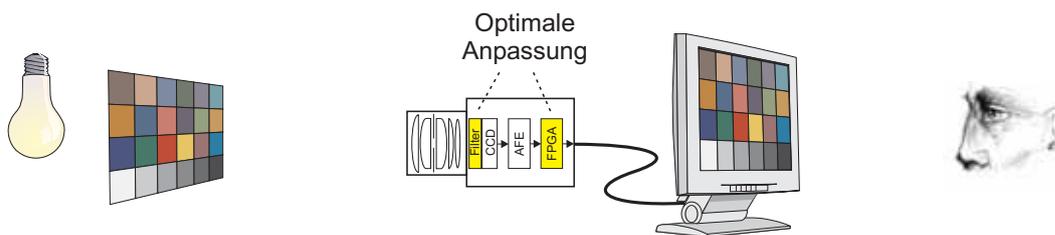


Abbildung 1.1: Die Kette der Komponenten zur Farbbildproduktion in den betrachteten Systemen

Das angestrebte modellbasierte Verfahren erfordert eine spektrale Charakterisierung aller Komponenten, die für Bildaufnahmesysteme zum derzeitigen Stand von Wissenschaft und Technik nicht geschlossen und praxistauglich gelöst ist. Unter dem Begriff des Bildaufnahmesystems wird in dieser Arbeit eine Einheit verstanden, die aus einer Optik, einem Bildsensor und der zur Digitalisierung der Bilddaten notwendigen Elektronik besteht. Bisher wird die spektrale Empfindlichkeit von Bildsensoren durch technisch aufwendige, kostenintensive Verfahren basierend auf in der Mittenwellenlänge veränderbarer schmalbandiger Strahlung gemessen (näherungsweise monochromatisch, s. z. B. [GBF<sup>+</sup>06]). Dieses direkte Messverfahren erfordert hohe Aufwendungen für die Anschaffung der Komponenten und deren Justage und Kalibrierung für einen Messvorgang. Weiterhin weisen schmalbandige Strahlungsverteilungen Nachteile in der erzielbaren Strahlungsleistung und bei der Vermessung komplett mit Optik montierter Systeme auf. Deshalb wird in dieser Arbeit die Umsetzung und Analyse einer indirekten Messmethode angestrebt.

---

<sup>1</sup>FPGA - Field Programmable Gate Array

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<sup>+</sup>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 Halbleiterwerkstoffs Silizium gemeinsam, welcher auf Grund seiner Bandlücke für die Strahlungsdetektion im Wellenlängenbereich bis etwa  $1100 \text{ nm}$  einsetzbar ist.

Grundsätzlich lassen sich die Silizium-Bildsensoren nach ihrer Herstellungstechnologie in zwei Gruppen, die der CMOS<sup>1</sup>- und die der CCD<sup>2</sup>-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.

---

<sup>1</sup>CMOS - Complementary Metal Oxide Semiconductor

<sup>2</sup>CCD - 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 (HVS<sup>3</sup>) 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 (LED<sup>4</sup>). 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-

---

<sup>3</sup>HVS - Human Visual System

<sup>4</sup>LED - 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 (CIE<sup>5</sup>) 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

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

<sup>5</sup>CIE - Commission Internationale de l'Éclairage