Farbmetrische Kalibrierung einer CCD-Videokamera unter Realweltbedingungen mit den Methoden des Color-Managements

Diplomarbeit
am Lehrstuhl für kognitive Systeme
des Instituts für Informatik und praktische Mathematik
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

in Zusammenarbeit mit der
Fa. Heidelberger Druckmaschinen AG

vorgelegt von
Birger Streckel

Betreuer:
Dr. Michael Hansen (Heidelberg Digital)
Prof. Dr. Gerald Sommer (CAU-Kiel)

Oktober 1999

Danksagung
Ich danke insbesondere der Fa. Heidelberg Digital in Kiel, die mir die Erstellung dieser Arbeit ermöglicht hat. Zudem gilt der Dank meinem Betreuer Dr. Michael Hansen für die kompetente und freundschaftliche Betreuung, Herrn Dr. Günther Bestmann und Uwe Krabbenhöft für ausführliche Beratung in fachlichen Dingen, sowie der gesamten Abteilung PPE-CT, die mir für die Dauer meiner Arbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die farbmetrische Kalibrierung einer CCD-Videokamera mit den im Bereich des Color-Managements etablierten Methoden. Mit der Farbkalibrierung soll erreicht werden, daß eine von der Kamera erzeugte Videobildfolge möglichst beleuchtungsinvariant auf ein beliebiges Ausgabemedium übertragen werden kann. Dabei sollen sowohl die Bildhelligkeit, als auch die Farben bei unterschiedlichen Beleuchtungen konstant bleiben.

Das bedeutet für den Inhalt der Arbeit, daß sowohl Farbverfälschungen, die durch unzureichenden Weißabgleich in den Kamerabildern auftreten, als auch unterschiedliche Beleuchtungssituationen erfaßt und korrigiert werden und die Bildfolge in einem beleuchtungsinvarianten Standardformat ausgegeben wird.

Zusätzlich soll diese Kalibrierung adaptiv erfolgen, d.h. Beleuchtungsänderungen sollen während der Aufnahme der Bildfolge erkannt und kompensiert werden. Dies ist zum Teil noch nicht vollständig in Videoechtzeit möglich. Daher ist es ebenfalls Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit, mit welcher Bildrate und Qualität die adaptive Kalibrierung auf einem zeitgemäßen Rechner möglich ist.

Die automatische Beleuchtungskompensation ergibt zusätzlich Einsatzmöglichkeiten des Verfahrens im Bereich des maschinellen Sehens. Durch die von Umweltbedingungen weitgehend unabhängige und prädizierbare Farbdarstellung ist es robuster möglich, Objekte anhand ihrer Farbe aus einem Bild zu extrahieren oder zu klassifizieren.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung

1.1. Was ist Color-Management?

Color-Management ist ein Begriff aus der Druck- und Medienindustrie. In diesem Fachbereich werden unterschiedliche Eingabekomponenten, wie z.B. Scanner oder Digitalkameras, und ebenso verschiedene Ausgabemedien, z.B. Druckmaschinen, Monitore oder Filmbelichter, verwendet. Ein wichtiger Anspruch an diese Geräte ist, daß bei der Reproduktion von Dokumenten keine Farbverfälschungen auftreten, unabhängig davon, welche Ein- oder Ausgabemedien verwendet werden.

Das ist in der Realität allerdings problematisch, da die unterschiedlichen Geräte i.A. mit unterschiedlichen Farbdarstellungen arbeiten. Das bedeutet, daß jedes Gerät einen eigenen, geräteabhängigen Farbumfang haben kann. Es kann der Fall auftreten, daß ein Gerät Farben, die von einem anderen aufgenommen werden, technisch nicht reproduzieren kann. Zusätzlich kommt es auch in den Farbbereichen, die von beiden Geräten unterstützt werden, zu teilweise erheblichen Farbverfälschungen. Es ist also schwierig, Farben zwischen den einzelnen Farbräumen so umzurechnen, daß diese für den Beobachter auf jedem System möglichst gleich erscheinen. Dieses Problem soll ein Color-Management-System lösen.

Um ein Color-Management-System zu etablieren, das diesen Anforderungen genügt, werden die Farbwerte des Eingabebildes in einen geräteunabhängigen Farbraum transformiert, der alle sichtbaren Farben umfaßt und damit alle geräteabhängigen Farbräume einschließt. Hierzu ist es sinnvoll, einen Farbraum zu wählen, dessen Metrik in etwa dem Farbempfinden des menschlichen Auges entspricht. Im Bereich des Color-Managements hat sich der CIE-L*a*b*-Farbraum etabliert, auf den in Abschnitt 2.3.3 noch genauer eingegangen wird. Von diesem Farbraum aus kann dann die Transformation in den speziellen geräteabhängigen Farbraum jedes Ausgabegerätes vorgenommen werden, das in das Color-Management-System eingebunden ist. Dabei werden die von dem Gerät nicht darstellbaren Farben geeignet auf darstellbare abgebildet.

Die Transformationen in und aus dem CIE-L*a*b*-Farbraum werden mit Hilfe von sogenannten *Geräteprofilen* berechnet. Jedes in das Color-Management-System eingegliederte Gerät besitzt ein speziell auf dieses Gerät abgestimmtes Profil, das die Umrechnung von Farben aus dem bzw. in den CIE-L*a*b*-Raum beschreibt. Eine ausführliche Beschreibung der Geräteprofile findet sich in Abschnitt 2.6.

Dies reicht für die Ausgabemedien wie Drucker oder Monitore schon aus, wenn davon ausgegangen wird, daß im CIE-L*a*b*-Raum ausschließlich Farbwerte vorliegen, die eine festgelegte und bekannte Beleuchtungssituation repräsentieren. Es muß daher bei der Überführung von Bilddaten in den CIE-L*a*b*-Raum eine Kalibrierung der

Körperfarben der dargestellten Objekte auf Normfarbwerte vorgenommen werden. Die festgelegte Beleuchtungssituation wird meist so gewählt, daß Körperfarben dargestellt werden, als würden die zugehörigen Gegenstände von einem standardisierten mittleren Tageslicht beleuchtet.

Da Eingabegeräte wie Scanner oder Farbkameras nicht automatisch in diesem Sinne korrekte Farbwerte liefern können, müssen diese Eingabegeräte kalibriert werden, um die geforderte korrekte Farbrepräsentation im CIE-L*a*b*-Raum zu gewährleisten. Für Scanner kann das Problem der Farbkalibrierung als weitgehend gelöst angesehen werden. Bei CCD-Kameras ist dieses Problem aufgrund der variablen Beleuchtungssituationen allerdings weitaus komplexer und soll in dieser Arbeit untersucht werden.

Um dem Leser die Wichtigkeit des Color-Managements nahezubringen, ist im Anhang in Abschnitt A.3 zweimal dasselbe von einer Farbvideokamera generierte Bild dargestellt, wobei nur das linke unter Anwendung eines Color-Management-Algorithmus ausgegeben ist, das rechte Bild ist ohne Umrechnung der Farben ausgegeben.

1.2. Farbkalibrierung im maschinellen Sehen

Farbbilder wurden im Bereich des maschinellen Sehens zunächst nur am Rande betrachtet. Mit den immer schneller werdenden Rechnern, rückt die Farbbildverarbeitung in den letzten Jahren jedoch immer stärker in den Mittelpunkt.

Ein Problem, das bei der Nutzung von Farbinformationen häufig auftritt, ist die fehlende Farbkonstanz. Unter nur leicht veränderten Beleuchtungsbedingungen kann sich die Farbinformation einer digital erfaßten Szene so stark ändern, daß eine sinnvolle Nutzung dieser zusätzlichen, durch die Farbe gewonnenen Information nur eingeschränkt möglich ist. Zudem ist es aus denselben Gründen schwer, aus der Farbrepräsentation eines Objektes in einem Kamerabild auf die tatsächliche Körperfarbe dieses Objektes zu schließen.

Die Farbe eines Objektes ist im maschinellen Sehen unter anderem ein hilfreiches Mittel, um Gegenstände, die eine bekannte Körperfarbe aufweisen, aus einem Bild zu extrahieren. Durch die fehlende Farbkonstanz ist es schwierig, eine bekannte Körperfarbe in einem Farbraum einzugrenzen, da diese unter verschiedenen Beleuchtungs- und Aufnahmebedingungen sehr unterschiedliche Werte aufweisen kann. Es wäre einfacher, Regionen zu detektieren, die sich durch bestimmte Farbmerkmale auszeichnen, wenn die Farben beleuchtungsinvariant dargestellt würden, d.h. trotz Änderung der Aufnahmesituation nur von der Körperfarbe des aufgenommen Objektes abhingen. Ideal wäre dabei, wenn die Körperfarbe des Objektes zusätzlich einfach meßbar wäre und damit Voraussagen über die spätere Repräsentation im Kamerabild getroffen werden könnten. Damit ließe sich der Suchraum einer Farbe als Unterraum des gesamten Farbraumes wesentlich eingrenzen und die Objektextraktion wäre unter Einbeziehung von Farbinformationen erheblich robuster möglich.

Eine weitere Anwendung der Beleuchtungsinvaranz von Kamerabildern im Bereich des maschinellen Sehens ist das *Color Indexing* [26], ein effizientes Verfahren zum Auffinden eines dargestellten Objektes in einer Bilddatenbank mittels Farbhistogramminformationen. Eine Beleuchtungsinvarianz der Eingabebilder würde für diese Anwendung eine Erkennung der Gleichheit eines von einer Kamera aufgenommenen Objektes mit einer Objektrepräsentation in der Datenbank auch unter variablen Beleuchtungsbedingungen garantieren.

1.3. Ziel der Diplomarbeit

Die zwei in den beiden vorhergehenden Abschnitten charakterisierten Aufgabenbereiche der Farbkalibrierung sind eng miteinander verknüpft und lassen sich, trotz ihrer völlig unterschiedlichen Anwendungen, mit identischen Methoden realisieren.

Dabei ist die Farbkalibrierung im Bereich des Color-Managements bereits erheblich eingehender untersucht worden als z.B. im maschinellen Sehen und sie hat sich auf diesem Gebiet bereits zu einem hohen Grade etabliert. Es liegt also nahe, von den im Color-Management gesammelten Erfahrungen in der Farbkalibrierung zu profitieren, um diese auf das maschinelle Sehen zu übertragen.

Das vorrangige Ziel dieser Arbeit ist es daher, ausgehend von den vorhandenen Methoden zur Farbkalibrierung eines Scanners, ein Verfahren zur Farbkalibrierung einer Videokamera zu entwickeln. Da die Firma Heidelberger Druckmaschinen einer der führenden Anbieter für Color-Management-Anwendungen im Bereich der Scannerkalibrierung ist und seit 1991 Software zur Kalibrierung von Scannern entwickelt (s. Anhang A.2), ist dort die nötige Erfahrung vorhanden, um eine fundierte Unterstützung bei der Lösung dieser Aufgabe zu bieten.

Das zu entwickelnde Kalibrierverfahren für Videokameras soll ermöglichen, eine Bildfolge im medienunabhängigen CIE-L*a*b*-Farbraum darzustellen und damit beleuchtungsinvariant eine farbgetreue Darstellung der betrachteten Szene zu erreichen. In dieser farbgetreuen Darstellung soll die Szene so erscheinen, als wäre sie unter normierten Beleuchtungsverhältnissen aufgenommen. Das bedeutet, daß die zu kalibrierende Bildfolge sowohl in der Helligkeit als auch in der Farbwiedergabe auf ein zuvor festgelegtes Normlicht kalibriert werden muß.

Für diese Aufgabe soll eine Anwendung implementiert werden, welche die Kalibrierung und Konvertierung in Videoechtzeit, also mit annähernd 25 Bildern pro Sekunde, durchführt und automatisch Beleuchtungsänderungen kompensiert. Zunächst wird ein der Scannerkalibrierung ähnliches Verfahren implementiert, welches durch Aufnahme und Erkennung einer bekannten Farbtafel ein *Kameraprofil* generiert, das die Kalibrierung unter den bei der Profilaufnahme herrschenden Beleuchtungsverhältnissen repräsentiert. Darauf aufbauend wird ein Verfahren entwickelt, das die variablen äußeren Bedingungen mißt und das Kalibrierverfahren hinsichtlich dieser neuen Umweltbedingungen anpaßt, so daß die Beleuchtungsinvarianz zu jedem Zeitpunkt möglichst gut gewährleistet werden kann.

Mit dieser Anwendung werden Untersuchungen über die mögliche Einbindung von Farbvideokameras in ein Color-Management-System angestellt. Es ist wichtig, mit welcher Geschwindigkeit und Qualität eine solche Kalibrierung möglich ist. Diesbezüglich werden verschiedene Untersuchungen durchgeführt.

Wie bereits im vorigen Abschnitt erwähnt, ist die Farbkalibrierung ebenfalls im Bereich des maschinellen Sehens einsetzbar. In diesem Zusammenhang werden zwei dort bereits erwähnte Anwendungen untersucht, mit dem Ziel, die Vorteile der farbmetrischen Kalibrierung einer Videokamera im maschinellen Sehen deutlich zu machen.

Die vorliegende Arbeit versucht also, die Farbkalibrierung einer CCD-Videokamera auf zwei unterschiedlichen Gebieten zu etablieren und die Funktionalität entsprechend der beiden Einsatzbereiche zu bewerten.

1.4. Einordnung der Arbeit in die Literatur

Die Farbkalibrierung eines (Video-) Kamerasystems wurde bereits in Publikationen anderer Autoren behandelt. Das vorwiegend verwendete Verfahren ist, wie auch in dieser Arbeit, die Aufnahme einer bekannten Farbtafel, deren Farbfelder Stützstellen zur Farbumrechnung liefern. Diese Methode der Kalibrierung wurde bisher insbesondere durch Lee [7], Strachan et al. [8] und Marszalec et al. [9] publiziert. Zudem haben Drew, Funt und Finlayson [11], [12], [13], [28],[30], auf dem Gebiet der farbmetrischen Kalibrierung weitreichende Forschungen betrieben.

R. L. Lee untersuchte 1988 als Erster die farbmetrische Kalibrierung einer Videokamera bei gleichzeitiger Konvertierung der Bilddaten in den CIE-XYZ-Farbraum [7]. Dabei unterlag die Kalibrierung allerdings wesentlichen Annahmen. Zum einen muß sowohl die Spektralverteilung der Umgebungsbeleuchtung als auch die spektrale Reflektanz der verwendeten Farbtafel unter Normlicht mit einem Spektralradiometer ausgemessen werden. Nach der Vermessung der Beleuchtung dürfen an dieser keine Veränderungen mehr vorgenommen werden, da dann eine neue Kalibrierung durchgeführt werden müßte. Zudem wird eine besonders gleichmäßige Ausleuchtung der Farbtafel für eine gute Kalibrierung vorausgesetzt. Das Verfahren von Lee wird ebenfalls in [2] erläutert.

Eine Weiterentwicklung des Verfahrens von Lee wurde 1990 von Strachan et al. vorgestellt [8]. In dieser Arbeit, wie in der vorliegenden, werden die Farbwerte der zur Kalibrierung verwendeten Farbtafel bereits mit einem Spektralphotometer gemessen und als bekannte Stützstellen dem System zur Verfügung gestellt. Allerdings wird wiederum eine exakt konstante Ausleuchtung der Farbtafel gefordert, die nur mit erheblichem Aufwand zu realisieren ist. Nach der Kalibrierung darf auch bei dem in dieser Arbeit vorgestellten Versuchsaufbau die Beleuchtung nicht mehr geändert werden. Zusätzlich zu den aufwendigen Kalibrieraufbauten hat das dort dargestellte Verfahren einen weiteren Nachteil. Die Kalibrierung wird nach einer Linearisierung der einzelnen Farbkanäle ausschließlich mit einer optimierten linearen Transformation vorgenommen. Praxistests haben jedoch gezeigt, daß eine lineare Transformation die Kameraeigenschaften nur unzureichend beschreibt. Durch die Verwendung einer Wertetabelle, wie in der vorliegenden Arbeit, kann eine nichtlineare Transformation zur Kalibrierung implementiert werden, die deutlich bessere Ergebnisse liefert.

Marszalec et al. haben sich 1994 erstmals von der Vorgabe der festgelegten Beleuchtungsbedingungen gelöst [9]. In dieser Veröffentlichung wird zum ersten Mal ein Kalibriersystem beschrieben, das unter beliebigen Beleuchtungssituationen funktioniert und sich ebenfalls automatisch an Beleuchtungsänderungen anpaßt, sich also ständig neu kalibriert. Die Beleuchtungssituation wird auch hier mit Hilfe einer bekannten Farbtafel rekonstruiert. Diese muß allerdings während des gesamten Kalibriervorganges, also auch während der automatischen Anpassung der Kalibrierfunktion, im Bild vorhanden sein, was eine wesentliche Einschränkung des Verfahrens bedeutet. Zusätzlich benötigt das System Informationen über die spektralen Sensitivitätskurven der Videokamera. Dennoch wurde schon 1994 eine videoechtzeitfähige Anwendung zur adaptiven Kalibrierung entwickelt, die sogar die Spektralverteilung der Umgebungsbeleuchtung näherungsweise rekonstruieren kann.

In [10] wurde 1995 von Kollhoff und Kempe ein zweistufiges Verfahren untersucht, welches in einer ersten Stufe eine farbmetrische Kalibrierung mittels einer linearen Transformation durchführt um später diese Kalibrierung mit einem Weißabgleich und damit einer weiteren linearen Transformation als „Vor-Ort-Kalibrierung" zu korrigieren. In dieser Arbeit wird gezeigt, daß durch den nachträglichen Weißabgleich gegenüber einer kompletten Neukalibrierung nur minimale Qualitätseinbußen auftreten und daß dieses Verfahren für nachträgliche Beleuchtungsänderungen eine gute Alternative zur Neukalibrierung darstellt. Aufgrund dieser guten Ergebnisse und der einfachen Berechnung der linearen Transformation für den Weißabgleich kommt das Verfahren auch in der vorliegenden Arbeit zur Anwendung, wobei zusätzlich einige Erweiterungen implementiert werden.

Eine weitere Arbeit auf diesem Gebiet wurde von Hubel et al. 1997 veröffentlicht [11], in dieser Arbeit werden die Kalibrierfehler unterschiedlicher Verfahren zur farbmetrischen Kalibrierung einer Kamera vergleichend ausgewertet. Sie dient als Grundlage zur Bewertung der Kalibrierqualität der vorliegenden Arbeit und ermöglicht die Einordnung der auftretenden Fehler gegenüber anderen Verfahren.

Alle in diesem Abschnitt aufgeführten Arbeiten verwenden zur Kalibrierung den von McCamy et al. 1976 entwickelten Macbeth-ColorChecker [33], der jedoch für die Kalibrierung von Kameras einen entscheidenden Nachteil aufweist. Da eine ungleichmäßige Ausleuchtung der Farbtafel zum Zeitpunkt der Bildaufnahme nicht festgestellt werden kann, muß eine möglichst gleichmäßige Ausleuchtung für den Kalibriervorgang hergestellt werden. Dieser Vorgang ist mit nicht unerheblichem Aufwand verbunden. Zudem hat der Color-Checker nur eine geringe Anzahl von Farbfeldern, die für die in den hier vorgestellten Veröffentlichungen realisierte Darstellung der nichtlinearen Kalibrierfunktion als eine lineare Transformation ausreichend ist. Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz, die nichtlineare Kalibrierfunktion durch eine Wertetabelle darzustellen, benötigt eine größere Anzahl von gleichmäßig über den Farbraum verteilten Farbfeldern, um gute Ergebnisse zu erzielen. In dieser Arbeit wird der Macbeth-ColorChecker nur für die Bewertung der erzielten Kalibrierqualität eingesetzt und wird in Abschnitt 8.1 ausführlicher dargestellt.

Ein anderer Ansatz, um beleuchtungsinvariante Farbkonstanz zu erzeugen, wird von Finlayson et al. verfolgt [13]. In diesem Ansatz wird ein Farbbild iterativ in der Beleuchtung und in der Farbe normalisiert, bis ein stabiler Zustand eintritt. Die normalisierten Farbwerte sind dann zwar im Idealfall beleuchtungsinvariant, sie sagen allerdings nichts mehr über die Körperfarben der aufgenommenen Objekte aus. Diese Methode wird einigen Anwendungen des maschinellen Sehens gerecht, nicht aber dem Color-Management, das den zusätzlichen Anspruch hat, standardisierte, zuvor festgelegte Farbrepräsentationen zu erzeugen. Auch im maschinellen Sehen sind

Anwendungen denkbar, für die eine beleuchtungsinvariante Farbdarstellung nötig ist, bei der keine Falschfarben auftreten.

Die vorliegende Arbeit stellt zudem einen anderen Anspruch an das Kalibriersystem als die in diesem Abschnitt beschriebenen Verfahren. Es soll versucht werden, eine Anwendung zur farbmetrischen Kalibrierung zu entwickeln, die bei beliebiger Beleuchtung ein möglichst farbnormiertes Kamerabild im CIE-L*a*b*-Raum erzeugt. Dabei wird in dieser Arbeit der Schwerpunkt auf Beleuchtungssituationen gelegt, die im täglichen Umgang mit einer Kamera vorkommen. Es werden bewußt keine speziell konstruierten Beleuchtungssituationen geschaffen, um die Kalibrierung zu perfektionieren. Das Verfahren soll unter Realweltbedingungen funktionieren. Es soll zudem untersucht werden, wie gut ein solches System unter Realweltbedingungen arbeiten kann, also z.B. mit einer Kalibrierung bei Tageslicht oder auch bei Deckenlampen unter stark ungleichmäßiger Ausleuchtung der Farbtafel. Damit wird in dieser Arbeit eine von den Zielen der oben dargestellen Verfahren grundlegend abweichende Zielsetzung verfolgt.

Weitere Aspekte zur Farbbildverarbeitung und zur farbmetrischen Kalibrierung werden von Sangwine und Horne [3] und von Koschan [6] gegeben.

1.5. Die Gliederung der Arbeit

Nachdem im einleitenden Teil das Thema dieser Arbeit dargestellt und von bestehenden Arbeiten abgegrenzt worden ist, geht Kapitel 2 zunächst auf die Grundlagen ein, die zum Verständnis dieser Arbeit nötig sind und eine Einordnung ermöglichen. Dabei handelt es sich in der Hauptsache um farbtheoretische und farbmetrische Grundlagen sowie einen Überblick über das verwendete Rechner- und Kamerasystem. Zusätzlich soll kurz der Ablauf der farbmetrischen Kalibrierung eines Scanners dargestellt werden, um später die Unterschiede zur Videokamerakalibrierung aufzeigen zu können.

In Kapitel 3 wird die Vorgehensweise der Videokamerakalibrierung erläutert. Es wird der Ablauf einer solchen Kalibrierung aufgezeigt und dargestellt, welche Algorithmen für welche Aufgaben implementiert werden müssen. Zusätzlich wird der Aufbau einer Farbtafel zur Kalibrierung von Videokameras beschrieben. Diese wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt.

Die Kapitel 4 und 5 erläutern detailliert Algorithmen, die zur statischen Kalibrierung der Kamerafarben auf die Beleuchtungsverhältnisse nötig sind, die zum Zeitpunkt der Kalibrierung vorherrschen. Die hier beschriebenen Algorithmen wurden bereits in Kapitel 3 in den Ablauf des gesamtem Verfahrens eingeordnet.

Das folgende Kapitel 6 beschreibt Algorithmen, die nötig sind, um die bisher erfolgte statische Kalibrierung automatisch an auftretende Beleuchtungsänderungen anzupassen und das Ergebnis diesen gegenüber invariant zu machen.

In Kapitel 7 wird, die Kenntnis der Algorithmik voraussetzend, noch einmal genau der Ablauf des implementierten Verfahrens und die Kopplung der Einzelschritte beschrieben, die während der Kalibrierung zur Anwendung kommen.

Dies ist für das folgende Kapitel 8 wichtig, in dem die Ergebnisse des Verfahrens dargestellt werden. Es sollte Klarheit darüber bestehen, mit welcher Implementation die dort aufgeführten Untersuchungsergebnisse erzielt werden, damit eine Bewertung dieser Ergebnisse überhaupt sinnvoll möglich ist. Die Auswertung wird mit unterschiedlichen Verfahren vorgenommen, die die beiden Anwendungsgebiete dieser Arbeit repräsentieren und die Qualität des Verfahrens sowohl für das Color-Management als auch für das maschinelle Sehen untersuchen.

In Kapitel 9 wird eine abschließende Zusammenfassung der Arbeit gegeben und die Bereiche aufgezeigt, in denen weitere Forschung nötig erscheint. Darüberhinaus wird diskutiert, in welchen Bereichen sich die vorliegende Arbeit bewährt hat und wo ihre Grenzen liegen.

Im Anhang findet sich ein Verzeichnis aller im Text verwendeten Abkürzungen, zudem eine Beschreibung der Firma Heidelberg Digital, in deren Hause diese Arbeit erstellt worden ist. Desweiteren werden dort Bilder gezeigt, die versuchen sollen, die Qualität der implementierten Kalibrierung dem Leser optisch nahezubringen.

2. Grundlagen

In diesem Kapitel sollen zunächst die Grundlagen für das Verständnis der weiteren Arbeit gegeben werden. Hierbei handelt es sich sowohl um Grundlagen aus der Farbtheorie, die zunächst behandelt werden, als auch um das verwendete Computersystem. Zudem soll exemplarisch der Vorgang der Scannerkalibrierung kurz beschrieben werden, um die Unterschiede zur in dieser Arbeit implementierten Videokamerakalibrierung deutlich zu machen und einige der aufgetretenen Probleme besser verdeutlichen zu können.

2.1. Einführung in die Farbtheorie

Um die Farbtheorie näher beleuchten zu können, müssen zunächst einmal zwei zentrale Fragen geklärt werden:

1. Was ist Farbe?
2. Wie werden Farben vom Menschen wahrgenommen?

Die erste der Fragen läßt sich einfach beantworten: Farbe ist eine Sinnesempfindung, verursacht durch elektromagnetische Strahlung im Bereich des sichtbaren Spektrums der menschlichen visuellen Wahrnehmung. Das bedeutet, eine Lichtquelle, die eine Farbwahrnehmung beim Menschen erzeugt, strahlt elektromagnetische Wellen im Bereich von 380 nm (violettes Licht) bis 780 nm (rotes Licht) ab. Der Abstrahlungsbereich einer Lichtquelle kann sowohl, wie z.B. beim Tageslicht, über das gesamte sichtbare Spektrum verteilt sein, als auch, wie beim Laserlicht, aus einer einzigen reinen Spektralfarbe bestehen. Diese beiden Spektralverteilungen sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Wird das von der Lichtquelle erzeugte Licht von einem Körper reflektiert und dann auf die Netzhaut eines Betrachters projiziert, entsteht eine Farbwahrnehmung. Die Spektralverteilung der auf die Retina fallenden elektromagnetischen Wellen nennt man Farbreizfunktion. Das Aussehen der Farbreizfunktion bestimmt, welche Farbwahrnehmung das reflektierte Licht bei einem menschlichen Betrachter hervorruft.

Daran schließt sich sofort die Antwort der zweiten Frage an. Zu deren Beantwortung wird der Aufbau des menschlichen Auges vorausgesetzt, dieser soll hier nicht weiter erläutert werden und ist z.B. in [5] nachzulesen. Aufschluß darüber, wie das menschliche Auge Farben wahrnimmt, gibt die Young-Helmholtzsche Dreikomponententheorie [14], die von Untersuchungen zur Farbfehlsichtigkeit und der menschlichen Sehzellen

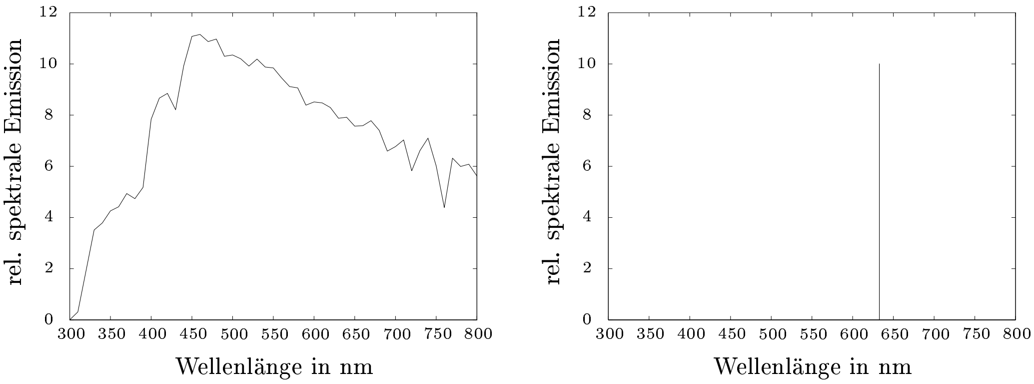

Abbildung 2.1.: Spektren der Normlichtart D50, die in etwa dem mittleren Tageslicht entspricht, (links) und des Lichtes eines roten He-Ne-Lasers (rechts).

gestützt wird und mittlerweile allgemein anerkannt ist. Danach gibt es drei verschiedene Arten von zapfenförmigen Sehzellen für das Farbensehen, die jeweils unterschiedliche spektrale Empfindlichkeiten aufweisen. Die Grundspektralwertkurven des trichromatischen Auges sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Die Kurven werden nach den drei bekannten Formen der Farbfehlsichtigkeit, der Protanopie, der Deuteranopie und der Tritanopie, mit $p(\lambda)$, $d(\lambda)$ und $t(\lambda)$ bezeichnet. Das hier dargestellte Kurventripel wurde von Hunt in [32] entwickelt.

Fällt nun Licht einer bestimmten Spektralverteilung auf die menschliche Netzhaut, wird jede Zapfenzelle genau dann gereizt, wenn der von ihr wahrgenommene Teil des Spektrums in dem auftreffenden Licht vorkommt. Die Stärke der Reize wird dann über

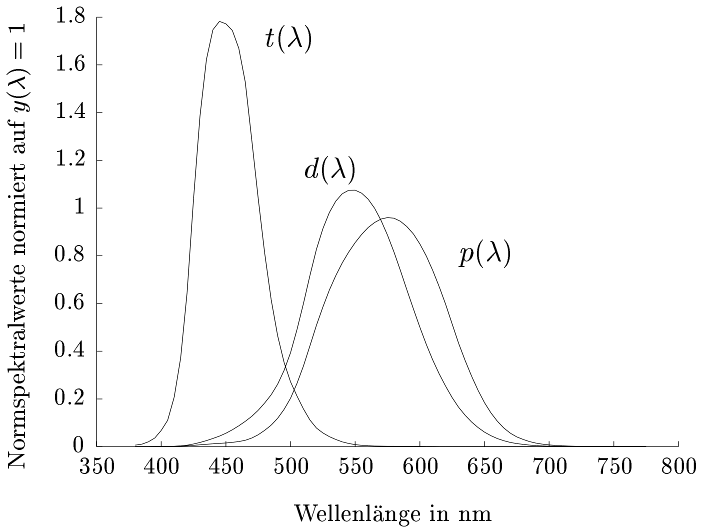

Abbildung 2.2.: Die PDT-Spektralwertkurven des menschlichen Auges.

Nervenbahnen an das Gehirn weitergeleitet. Das dieser Darstellung zugrundeliegende Sensormodell der Farbwahrnehmung wird im folgenden Abschnitt 2.2 beschrieben.

Die Farbreizfunktion eines Körpers wird also vom menschlichen Auge auf nur drei Parameter abgebildet, was einer starken Vereinfachung der Wirklichkeit entspricht. Dadurch läßt sich zu jeder Spektralverteilung eine Farbe finden, die einen identischen Farbreiz auf der Netzhaut erzeugt und nur aus drei reinen Spektralfarben besteht. Man kann für das menschliche visuelle System den Farbraum von unendlich vielen Dimensionen auf drei Dimensionen reduzieren. Auf dieser Grundlage basiert die Farbtheorie.

2.2. Das Sensormodell der Farbwahrnehmung

In diesem Abschnitt soll das bereits angesprochene Sensormodell der Farbwahrnehmung verdeutlicht werden. Dabei wird in der folgenden Betrachtung davon ausgegangen, daß ein Körper mit einem Reflektionsfaktor $R(\lambda)$ von einer Lichtquelle mit der Spektralverteilung $\phi(\lambda)$ beleuchtet wird. Die Farbreizfunktion, die entsteht, wenn der Körper von der Lichtquelle angestrahlt wird, ist $R(\lambda) \cdot \phi(\lambda)$. Diese Funktion wird von einem Beobachter oder auch einer Kamera mit drei Farbrezeptoren A, B und C wahrgenommen, die die Spektralwertkurven $s_A(\lambda)$, $s_B(\lambda)$ und $s_C(\lambda)$ aufweisen. Unter diesen Bedingungen erhält man die Farbwerte F_A, F_B und F_C der Farbrezeptoren durch

$$\begin{aligned} F_A &= \int R(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot s_A(\lambda)\, \partial\lambda\,, \\ F_B &= \int R(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot s_B(\lambda)\, \partial\lambda\,, \\ F_C &= \int R(\lambda) \cdot \phi(\lambda) \cdot s_C(\lambda)\, \partial\lambda\,. \end{aligned} \tag{2.1}$$

Mit diesem Modell lassen sich Farbwerte für jede Art von Farbrezeptoren beschreiben, die Spektralwertkurven besitzen. Das Modell ist also sowohl auf die Farbwahrnehmung des menschlichen Auges anwendbar, als auch auf die Bildgenerierung in einer Farbkamera.

Das Ziel der Farbkalibrierung in dieser Arbeit ist es nicht, den Reflektionsfaktor des beleuchteten Körpers $R(\lambda)$ für jede Wellenlänge λ genau zu bestimmen. Mit der hier vorgestellten Kalibrierung sollen Voraussagen über die Farbwerte F_A, F_B und F_C einer Videokamera auf ein Objekt getroffen werden. Dieses Objekt kann beliebig gefärbt sein und unter einer beliebigen Beleuchtungssituation mit einer CCD-Farbvideokamera aufgenommen werden. Das implementierte Verfahren trifft dann Voraussagen über die Farbwerte desselben Objektes unter der normierten Tageslichtart D50.

Dabei soll nicht nur die Unabhängigkeit der Farbwerte von der Beleuchtung des Objektes gewährleistet sein, wie es für Anwendungen des maschinellen Sehens, in denen ausschließlich Farbkonstanz gefordert wird, häufig der Fall ist. In dieser Arbeit soll zusätzlich eine Unabhängigkeit von der bauartbedingten Farbrezeption der Kamera erreicht werden. Im Idealfall hängen die von der Kamera wahrgenommenen

Farbwerte F_A, F_B und F_C für ein aufgenommenes Objekt nach der Kalibrierung ausschließlich von dessen Reflektionsfaktor $R(\lambda)$ und einer möglichen ungleichmäßigen Ausleuchtung der Szene ab. Unterschiedlicher Lichteinfall in einzelnen Bereichen eines Objektes mit konstantem $R(\lambda)$ wird nicht kompensiert.

2.3. Farbräume

Da sich die menschliche Farbwahrnehmung mit drei Parametern beschreiben läßt, reicht also ein dreidimensionaler Vektorraum aus, um alle vom Menschen unterscheidbaren Farben darzustellen. In der Farbtheorie wurde eine Vielzahl von unterschiedlichen dreidimensionalen Farbräumen entwickelt.

Der Großteil der verwendeten Farbräume unterscheidet sich ausschließlich durch die Wahl der Basis. Diese Farbräume lassen sich durch lineare Transformationen ineinander überführen, zudem sind sie linear den Farbraum des menschlichen Auges transformierbar. Die beiden wichtigsten Vertreter dieser Gruppe der Farbräume sollen zunächst betrachtet werden.

2.3.1. Die Primärvalenzen und der CIE-RGB-Farbraum

Um die Gruppe der linear in den Farbraum des menschlichen Auges transformierbaren Farbräume beschreiben zu können, hat sich der Begriff der *Primärvalenzen* etabliert. Primärvalenzen sind die Basisvektoren der Farbräume, sie werden unterschieden in reelle und virtuelle Valenzen. Reelle Valenzen sind durch physikalische Farben darstellbar, während sich aus virtuellen Valenzen zwar rechnerisch vom Menschen sichtbare Mischfarben bilden lassen, sie selbst können jedoch nicht aus Spektralfarben ermischt werden. Damit existiert auch keine Farbreizfunktion für eine virtuelle Valenz, man sagt, virtuelle Valenzen liegen außerhalb des Spektralfarbenzuges. In diesem Abschnitt sollen die Primärvalenzen beispielhaft anhand des CIE-RGB-Farbraumes deutlich gemacht werden.

Der RGB-Farbraum, zu unterscheiden von dem standardisierten CIE-RGB-Farbraum, ist sowohl der einfachste und intuitivste unter den Farbräumen, als auch einer der wichtigsten. Er ist gerätebasiert, d.h. seine Primärvalenzen werden anhand von technischen Anforderungen für jedes Gerät individuell festgelegt. Im Allgemeinen sind das die Anforderungen der Fernseher, Monitore und der Kameras, die den entsprechenden Farbraum verwenden. Daher hat dieser Farbraum ausschließlich reelle Primärvalenzen, die von den entsprechenden Geräten erzeugt oder aufgenommen werden können. Jedes Gerät kann einen eigenen RGB-Raum verwenden, der mehr oder weniger stark von dem im folgenden dargestellten Standard abweicht. Bis heute arbeiten Videokameras, Fernseher sowie Computermonitore mit RGB-basierten Farbräumen. Daher soll dieser Farbraum hier zunächst näher erläutert werden.

Der CIE-RGB-Farbraum ist der erste Farbraum, der von der CIE, der Internationalen Beleuchtungskommision, im Jahre 1931 als international verbindliches Farbmaßsystem festgelegt wurde. Die Basis des CIE-RGB-Farbraumes besteht aus spektralen Wellenlängen, die mit einer Quecksilber-Gasentladungslampe als monochromatische Lichtbündel erzeugt werden können. Ihre Wellenlängen λ_R, λ_G, λ_B und Intensitäten

I_R, I_G, I_B (normiert auf $I_b = 1$) sind im folgenden aufgeführt. Die Intensitätswerte für die einzelnen Primärvalenzen basieren auf der unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeit des menschlichen Auges in verschiedenen Bereichen des sichtbaren Spektrums.

$$\begin{aligned} \lambda_R &= 700 \text{ nm}, & I_R &= 74.1 \\ \lambda_G &= 546,1 \text{ nm}, & I_G &= 1.4 \\ \lambda_B &= 435,8 \text{ nm}, & I_B &= 1 \end{aligned}$$

Die Wahl dieser Primärvalenzen ist relativ willkürlich. In gängigen Systemen, die auf einem RGB-Farbraum arbeiten, werden meist abweichende RGB-Primärvalenzen verwendet, wobei die Gerätehersteller sich aber durchaus an den CIE-RGB-Valenzen orientieren, um eine Kompatibilität der verschiedenen Geräte untereinander zu erreichen. Die Unterschiede der gerätebasierten RGB-Farbräume machen aber in der prinzipiellen Darstellung des RGB-Farbraumes keine wesentlichen Veränderungen aus, daher wird hier der CIE-RGB-Farbraum beispielhaft für alle gerätebasierten RGB-Farbräume beschrieben.

Die Spektralwertkurven des von der CIE standardisierten CIE-RGB-Farbraumes sind in Abbildung 2.3 dargestellt. Diese sind durch eine lineare Transformation aus den PDT-Spektralwertkurven des menschlichen Farbensehens ableitbar.

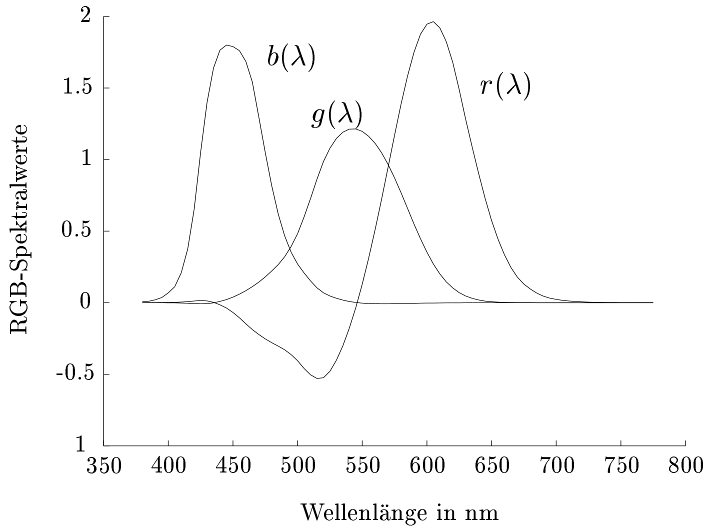

Abbildung 2.3.: Die Spektralwertkurven des RGB-Raumes.

Außergewöhnlich ist hierbei, daß die Spektralwertkurve des roten Lichtes $r(\lambda)$ im Bereich von etwa 440 nm bis 545 nm einen negativen Wert aufweist. Das bedeutet, daß aus den drei RGB-Primärvalenzen die entsprechenden Spektralfarben physikalisch nicht mischbar sind. Rechnerisch ist diese Mischung jedoch ohne weiteres möglich. Man nennt diese Art der Farbmischung *äußere Mischung*, die Terminologie leitet sich aus der Darstellung des Spektralfarbenzuges im Farbraum her, auf die später noch näher eingegangen wird. An dieser Stelle wird schon die Einschränkung deutlich, der jeder RGB-Farbraum unterliegt. Nicht alle sichtbaren Farben können tatsächlich mit Hilfe der Primärvalenzen dargestellt werden.

In Abbildung 2.4 ist ein allgemeiner RGB-Farbraum schematisch in drei Dimensionen dargestellt, oft wird aber auch eine Normierung der Farbwerte auf eine konstante Farbhelligkeit mit $r + g + b = 1$ vorgenommen, um eine einfachere schematische Darstellung des Farbraumes in einer zweidimensionalen Farbtafel zu ermöglichen. Dazu werden die Gleichungen

$$r = \frac{R}{R+G+B} \;, \quad g = \frac{G}{R+G+B} \;, \quad b = \frac{B}{R+G+B} \tag{2.2}$$

verwendet und die Werte r und g auf der x- und der y-Achse einer Farbtafel aufgetragen. Eine solche Farbtafel ist für den CIE-RGB-Farbraum in Abbildung 2.5 dargestellt. In der Abbildung sind die im CIE-RGB-Raum erzeugbaren Mischfarben koloriert. Farben, für die $r < 0$, $g < 0$ oder $r + g > 1$ gilt, lassen sich nicht aus den Primärvalenzen ermischen. Die zweidimensionale Farbtafel ist unabhängig von der Farbhelligkeit und gibt nur den Farbton wieder. Schon hier erkennt man, daß es einfach ist, eine Farbdarstellung zu entwickeln, in der die eindimensionale Helligkeitsinformation von der zweidimensionalen Farbinformation separiert ist. Es wurde eine ganze Reihe von Farbräumen entwickelt, die dieses leisten.

Wie bereits oben erwähnt, ergeben sich aus der Lage der Primärvalenzen bei allen RGB-Farbräumen zwei Probleme.

Das schwerwiegendste der Probleme ist, daß nicht alle von menschlichen Auge wahrnehmbaren Farben aus den RGB-Primärvalenzen ohne äußere Mischung ermischt werden können. Ein nicht unerheblicher Teil des Spektralfarbenzuges liegt außerhalb des RGB-Primärvalenzdreiecks. Dieser ist in Abbildung 2.5 dargestellt und man erkennt, daß ein großer Teil außerhalb des Farbbereiches liegt, der aus den RGB-Primärvalenzen erzeugbar ist.

Ein weiterer Nachteil des RGB-Raumes ist die Tatsache, daß die Metrik nicht mit der des menschlichen Auges gekoppelt ist. Das bedeutet: gleichabständige Farben

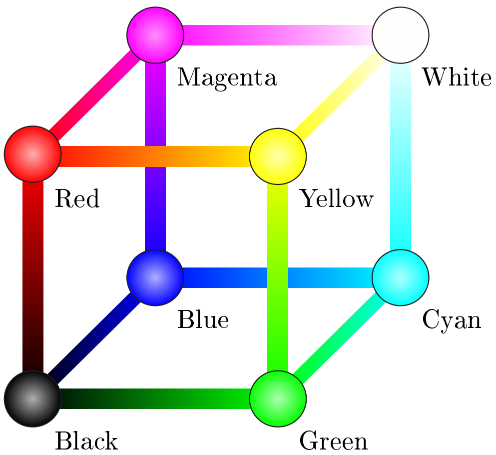

Abbildung 2.4.: Ein dreidimensionaler RGB-Farbraum.

im RGB-Raum wirken auf einen menschlichen Beobachter i.A. nicht gleichabständig. Gleichabständig für einen menschlichen Betrachter, sind z.B. zwei Farbenpaare, deren Farben der Betrachter jeweils gerade eben unterscheiden kann. Idealerweise hätten diese Farbenpaare im RGB-Raum mit einer Euklidischen Metrik einen identischen Abstand. Dieses ist allerdings nicht der Fall, so kann das menschliche Auge beispielsweise grüne Farben genauer differenzieren als rote oder blaue. Es ist also anhand der Farbwerte nur schwer zu beurteilen, ob für einen Menschen zwei Farben noch unterscheidbar sind, oder ob er die Farbdifferenz nicht mehr wahrnehmen kann.

Um zumindest dem ersten dieser Nachteile entgegenzuwirken und einen Farbraum zu schaffen, in dem alle von menschlichen Auge wahrnehmbaren Farben mischbar sind, ist der CIE-XYZ-Raum standardisiert worden, der im folgenden Abschnitt ausführlich erläutert wird.

2.3.2. Der CIE-XYZ-Farbraum - Das Normfarbsystem

Der CIE-XYZ-Raum, häufig auch mit *Normfarbsystem* bezeichnet, wurde ebenfalls 1931 von der CIE als Standard festgelegt und ist durch eine lineare Transformation in jeden RGB-Raum überführbar. Der Unterschied zum RGB-Farbraum besteht darin, daß der CIE-XYZ-Farbraum ausschließlich virtuelle Primärvalenzen besitzt. Das bedeutet, seine Primärvalenzen sind Farben, die in einer Farbtafel außerhalb des Spektralfarbenzuges liegen und somit nicht mit physikalischen Mitteln erzeugt werden können. Er ist damit ein geräteunabhängiger Farbraum, der so konzipiert wurde, daß er alle sichtbaren Farben und damit alle möglichen geräteabhängigen Farbräume einschließt.

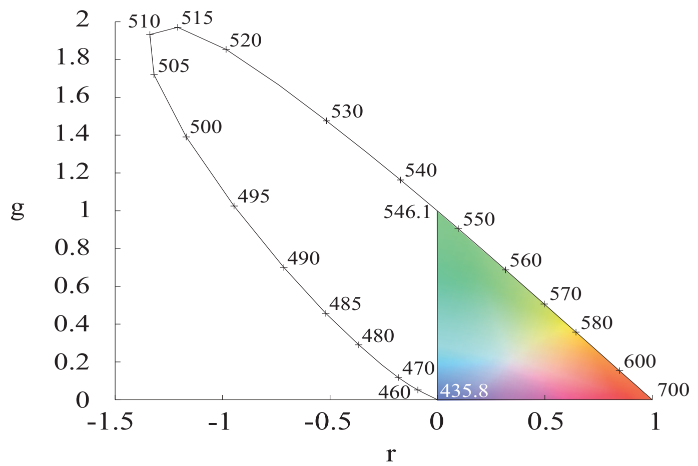

Abbildung 2.5.: Die helligkeitsunabhängige CIE-RGB-Farbtafel mit der Lage des Spektralfarbenzuges.

Die Transformation des CIE-RGB- in den CIE-XYZ-Raum wird folgendermaßen vorgenommen:

$$\begin{pmatrix} 0.490 & 0.310 & 0.200 \\ 0.177 & 0.812 & 0.011 \\ 0.000 & 0.010 & 0.990 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \tag{2.3}$$

Die Rücktransformation wird entsprechend mit der inversen Matrix erreicht.

Eine Transformation von nicht standardisierten, geräteabhängigen RGB-Primärvalenzen in den CIE-XYZ-Farbraum wird i.A. mit einer Matrix vorgenommen, die sich von dieser Transformationsmatrix unterscheidet. Die Abweichung der Matrixkoeffizienten orientiert sich dabei an der Stärke der Abweichung der gerätebasierten RGB-Valenzen zu den CIE-RGB-Valenzen. Die korrekte Transformationsmatrix für handelsübliche Geräte ist für den Benutzer i.A. nicht bekannt.

Die Wahl der Primärvalenzen X, Y, und Z basiert auf den Farbempfindlichkeiten des menschlichen Auges. Um zu gewährleisten, daß alle vom Menschen sichtbaren Farben innerhalb des CIE-XYZ-Farbraumes liegen, wurde durch Messungen mit einer Testgruppe der sogenannte 2° - Normbeobachter festgelegt, dessen Farbsicht in etwa dem Mittel der Bevölkerung entspricht. In dem Testverfahren wurden den Probanden zwei Farbflächen von 2° Gesichtsfeldgröße gezeigt, eine spektral reine Farbe und eine aus drei Primärvalenzen ermischte. Die Probanden sollten jeweils erkennen, wann die beiden Flächen die gleiche Farbe aufweisen. Basierend auf diesen Messungen wurden die Normspektralwertkurven des farbmetrischen 2° - Normalbeobachters entwickelt und von der CIE 1931 die XYZ-Primärvalenzen festgelegt [17]. Die Normspektralwertkurven für den CIE-XYZ-Farbraum sind in Abbildung 2.6 dargestellt.

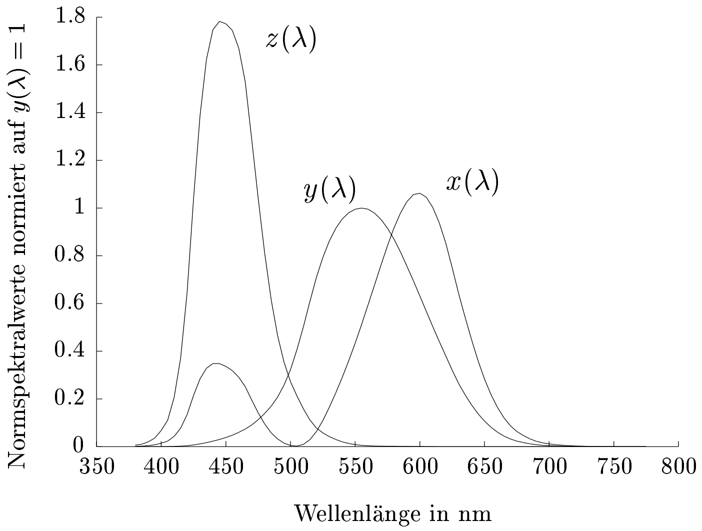

Abbildung 2.6.: Spektrale Farbrezeption eines 2°-Normalbeobachters.

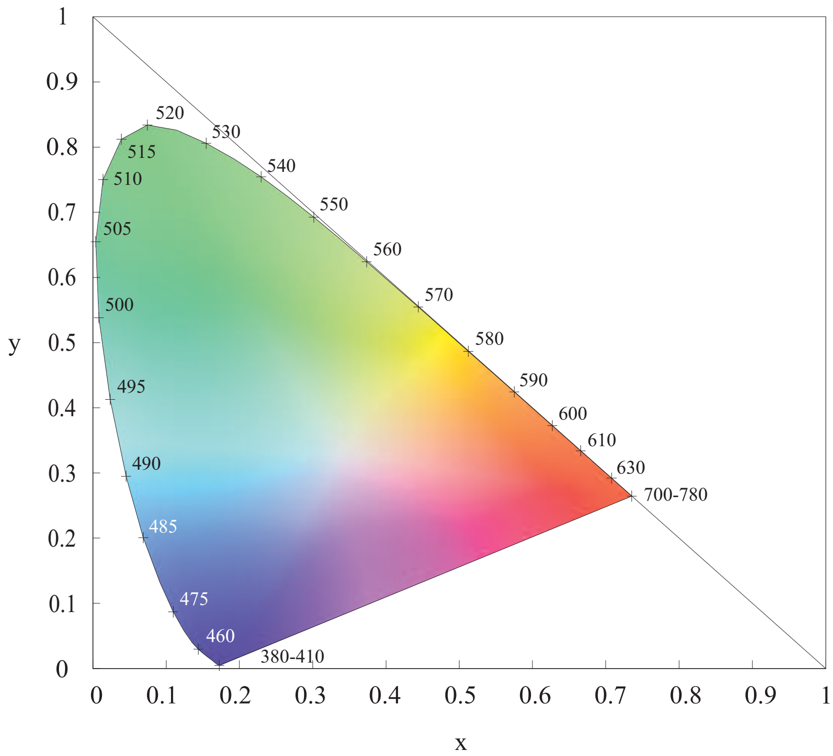

Abbildung 2.7.: Die helligkeitsunabhängige CIE-XYZ-Farbtafel mit der Lage des Spektralfarbenzuges.

Wenn auch im CIE-XYZ-Farbraum mittels der Gleichungen

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}\,, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}\,, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z} \tag{2.4}$$

eine Normierung auf $x + y + z = 1$ vorgenommen wird, entsteht die in Abbildung 2.7 dargestellte Farbtafel. Auch der Unbuntpunkt bei $x = y = z = \frac{1}{3}$ ist in dieser Abbildung deutlich zu erkennen. Man sieht hier, daß der gesamte Spektralfarbenzug aus den drei Primärvalenzen additiv mischbar ist.

Durch eine derartige Definition des Farbraumes ist das erste der obengenannten Probleme der RGB-Räume gelöst, d.h. der gesamte Spektralfarbenzug läßt sich aus den Primärvalenzen des CIE-XYZ-Raumes ohne äußere Mischung erzeugen. Das zweite Problem besteht allerdings nach wie vor, für den Menschen gleichabständige Farben haben auch im CIE-XYZ-Raum nach der Euklidischen Metrik unterschiedliche Abstände.

2.3.3. Der CIE-L*a*b*-Farbraum

Zur Lösung dieses zweiten Problems wurden weitere Untersuchungen durchgeführt. Zunächst wurde versucht, die Gleichabständigkeit durch einen linear in den RGB- bzw. den CIE-XYZ-Raum transformierbaren Farbraum zu erreichen. Am nächsten kommt diesem Anspruch der ebenfalls von der CIE normierte L*u*v*-Farbraum, auf den hier nicht weiter eingegangen werden soll. Bei diesen Untersuchungen wurde festgestellt, daß zum Erzielen der Gleichabständigkeit ein zum CIE-XYZ-Raum nichtlinearer Farbraum benötigt wird.

Durch diese Feststellung wurde die Gegenfarbtheorie von Hering [15] gestützt, die dieser im Jahre 1872 als eine Grundlage des menschlichen visuellen Systems veröffentlicht hat. Sie postuliert einen Farbraum aus Gegenfarbachsen, wobei Gelb und Blau, sowie Grün und Rot als Gegenfarben angenommen werden. In der Mitte, bei gleichen Mischverhältnissen der Gegenfarben, liegt eine Unbuntachse, die den Verlauf von Schwarz nach Weiß darstellt. Die Anordnung der Gegenfarben ist in der Darstellung des CIE-L*a*b*-Farbraumes in Abbildung 2.8 zu erkennen. Ein auf diese Weise konstruierter Farbraum beschreibt das menschliche Farbempfinden (Farbempfinden ist nicht zu verwechseln mit der Farbwahrnehmung) erheblich besser als die Young-Helmholtzsche Dreikomponententheorie. Es wird heute angenommen, daß die Gegenfarbtheorie die Verarbeitung der Farbinformationen im menschlichen Gehirn beschreibt, während die Dreikomponententheorie deren Akquisition verdeutlicht.

Auf dieser Grundlage wurde der CIE-L*a*b*-Farbraum entwickelt und von der CIE 1976 als „näherungsweise gleichabständig zur menschlichen Farbwahrnehmung" empfohlen. Dieser Farbraum basiert auf dem CIE-XYZ-Raum und ist damit ebenfalls geräteunabhängig, d.h. er umfaßt alle vom menschlichen Auge sichtbaren Farben. Um die empfindungsgemäße Gleichabständigkeit der Farbraummetrik zu gewährleisten wurde die Nichtlinearität in Kauf genommen. Die Farbraumkoordinaten L^*, a^* und b^* werden aus den XYZ-Primärvalenzen wie folgt berechnet:

$$
\begin{aligned}
L^* &= \begin{cases} 116\sqrt[3]{Y/Y_n} - 16 & \text{falls } Y/Y_n > 0.008856 \\ 903.3\, Y/Y_n & \text{sonst,} \end{cases} \\
a^* &= 500(f(X/X_n) - f(Y/Y_n)), \\
b^* &= 200(f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)) \qquad \text{mit} \\
f(x) &= \begin{cases} \sqrt[3]{x} & \text{falls } x > 0.008856 \\ 7.787\, x + 16/116 & \text{sonst.} \end{cases}
\end{aligned}
\tag{2.5}
$$

Dabei repräsentiert L^* die Helligkeit, a^* die Rot-Grün- und b^* die Gelb-Blau-Buntheitsachse. Für unbunte Farben sind a^* und b^* jeweils gleich Null. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Farbräumen läßt sich das CIE-L*a*b*-System aufgrund seiner Nichtlinearität nicht als Farbtafel darstellen. In Abbildung 2.8 wird daher der CIE-L*a*b*-Raum schematisch in seinen drei Dimensionen dargestellt.

Eine Farbe im L*a*b*-Raum laßt sich durch die drei Parameter *Helligkeit*, *Bunttonwinkel* und *Sättigung* beschreiben. Die Helligkeit wird durch L^* angegeben, je höher der Wert für L^* ist, desto heller ist eine Farbe. Der Bunttonwinkel von 0° bis 360° beschreibt den Farbton. Dabei hat die positive a^*-Achse den Bunttonwinkel 0° und die positive b^*-Achse den Winkel von 90°. Die Sättigung wird durch die Entfernung einer Farbe zur Unbuntachse angegeben. Je weiter eine Farbe von dieser entfernt ist, desto stärker gesättigt ist sie.

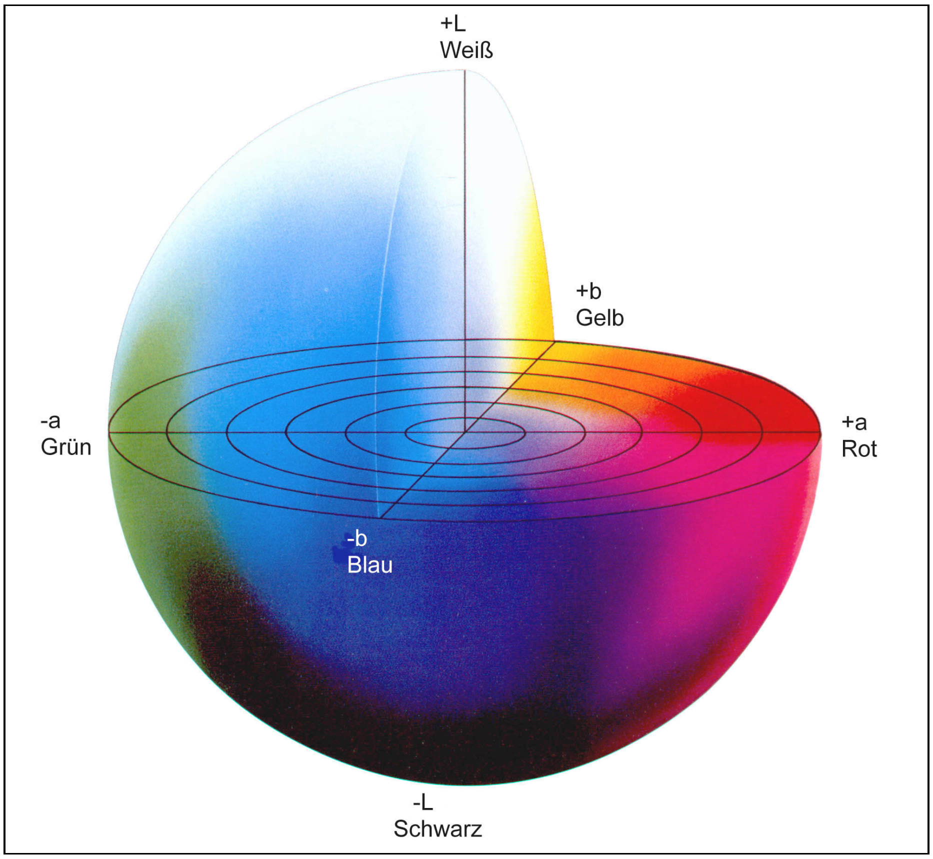

Abbildung 2.8.: Schematische Darstellung des CIE-L*a*b*-Farbraumes.

Dieser CIE-L*a*b*-Farbraum vereinigt alle von Color-Management gestellten Anforderungen und hat sich daher in diesem Anwendungsbereich etabliert.

Weiterführende ausführliche Erläuterungen zur Farbtheorie, Farbräumen und Farbdarstellungen sind in [1], [2] und [3] gegeben.

2.4. Das verwendete Computersystem

In diesem Abschnitt soll das verwendete Computersystem näher beschrieben werden, damit die Laufzeitangaben in dieser Arbeit eine Grundlage erhalten. Weiterhin wird auf die Videokamera und die von ihr generierten Daten eingegangen.

Bei der Anschaffung des Systems wurde darauf geachtet, daß die Hardware zwar dem Stand der Technik zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit entspricht, aber keine Spezialhardware zur Lösung der Probleme verwendet wird.

2.4.1. Der Rechner

Verwendet wird ein Intel Pentium II Prozessor mit einer Taktfrequenz von 350 MHz unter dem Betriebssystem Microsoft Windows NT 4.0. Der Rechner ist mit einem Mainboard (ASUS P2B AGP) mit einer Busfrequenz von 100 MHz und 256 MB Arbeitsspeicher versehen. Es wird eine Festplatte (SCSI) mit einer Zugriffszeit von 8 ns verwendet. Die Grafikkarte (Matrox Millenium G200) hat einen Grafikspeicher von 8 MB. Alle in der Arbeit vorkommenden Zeitangaben beziehen sich auf diesen Rechner, auf dem die selbsterstellte Kalibriersoftware während der Zeitmessung als einzige Software neben dem Betriebssystem läuft.

2.4.2. Die Framegrabberkarte

Die Framegrabberkarte der Firma Image Technology ist ein modulares System, bestehend aus einer PCI-Steckkarte mit 4 MB Bilddatenspeicher, an die über einen eigenen Datenbus die einzelnen Grabberkarten angeschlossen werden. In diesem speziellen Fall ist eine einzige Grabberkarte angeschlossen, die von bis zu zwei Farbvideokameras RGB-Daten empfangen kann. Es wurde darauf geachtet, daß die Möglichkeit besteht, die RGB-Signale getrennt auf drei eigenen Videokanälen von der Kamera in den Rechner zu übertragen. Einfache Videokameras generieren ein PAL- oder NTSC-Videosignal, bei dem die drei RGB-Kanäle auf eine einziges, analoges Trägersignal moduliert werden. In diesem Fall muß die Bildinformation wiederum von der Framegrabberkarte in die drei Farbkanäle separiert werden. Die hier verwendete Framegrabberkarte empfängt die RGB-Daten auf drei separaten Kanälen. Die Farbtreue der Kamera durch getrennte Übertragung der RGB-Kanäle nachweislich verbessert.

2.4.3. Die CCD-Videokamera

Als Videokamera wurde eine Sony XC-003P CCD-Kamera mit einer Auflösung von $752 * 582$ Bildpunkten verwendet. Jeder Bildpunkt wird durch 24 Bit repräsentiert, d.h. auf jeden der drei Farbkanäle entfallen 8 Bit. Die Kamera zeichnet sich durch zwei Besonderheiten aus. Zum einen ist es wie bei der Framegrabberkarte möglich, RGB-Signale auf drei separaten Kanälen zu übertragen. Diese separate Übertragung der RGB-Daten wurde für die vorliegende Arbeit ausschließlich verwendet.

Als zweite Besonderheit ist die Sony-Kamera eine sogenannte 3-Chip-CCD-Kamera, im Gegensatz zu den günstigeren und häufiger anzutreffenden 1-Chip-CCD-Kameras. Um den grundlegenden Unterschied zwischen diesen beiden Kameratypen verstehen zu können, muß man wissen, daß ein CCD-Chip eine in etwa konstante spektrale Rezeptionskurve über das gesamte sichtbare Spektrum aufweist und damit lediglich Helligkeitsinformationen der Szenerie registrieren kann. Ein CCD-Chip ist somit an sich nur für Grauwertkameras geeignet. Um allerdings doch Farbinformationen gewinnen zu können, bedient man sich zweier Tricks. Der erste ist in der 1-Chip- und der zweite in der 3-Chip-CCD-Kamera verwirklicht.

Eine 1-Chip-CCD-Kamera hat lediglich einen CCD-Chip, auf den direkt das Licht der aufgenommenen Szenerie fällt. Farbinformationen werden mit dieser Kamera gewonnen, indem man einzelne CCD-Sensoren wechselweise mit RGB-Farbfiltern bedampft.

Ein Ausschnitt aus einer solchen Sensorfläche ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Da allerdings immer nur ein Farbwert pro Bildpunkt bekannt ist, müssen die fehlenden Farbwerte durch Interpolation aus den umliegenden Feldern berechnet werden. Auf der Chipfläche sind doppelt so viele Grünsensoren vorhanden, wie Rot- oder Blausensoren, da die spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges im Grünbereich am stärksten ausgeprägt ist, und hier exaktere Werte die höchste Bildqualität liefern.

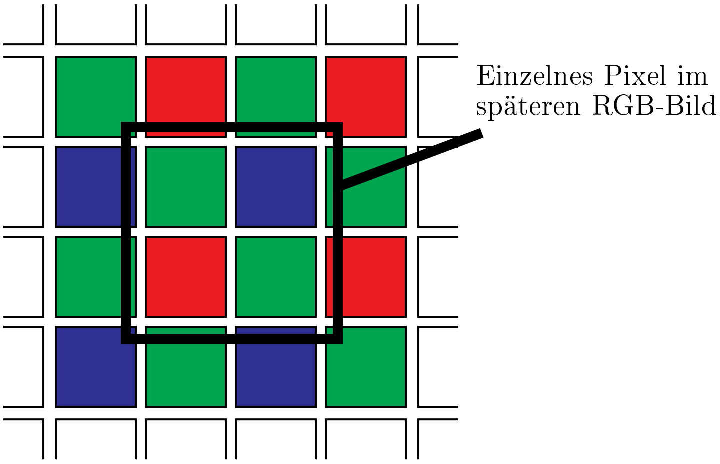

Abbildung 2.9.: Ausschnitt aus der Sensorfläche einer 1-Chip-CCD-Farbkamera.

Die 3-Chip-CCD-Kamera geht einen aufwendigeren Weg, um Farbinformationen zu gewinnen. Das einfallende Licht wird mittels eines Prismas in rote, grüne und blaue Spektalanteile gebrochen und auf drei CCD-Chips abgebildet. Dadurch stellt jeder der drei Chips einen RGB-Farbkanal dar. Eine solche Farbkamera ist schematisch in Abbildung 2.10 dargestellt. Dieser Kameratyp verlangt eine präzise Optik und ist daher aufwendiger in der Produktion.

Diese Art, Farbinformationen zu erlangen, ermöglicht eine exaktere Wiedergabe der aufgenommenen Szene. Da keine Interpolation nötig ist, bietet eine 3-Chip-CCD-

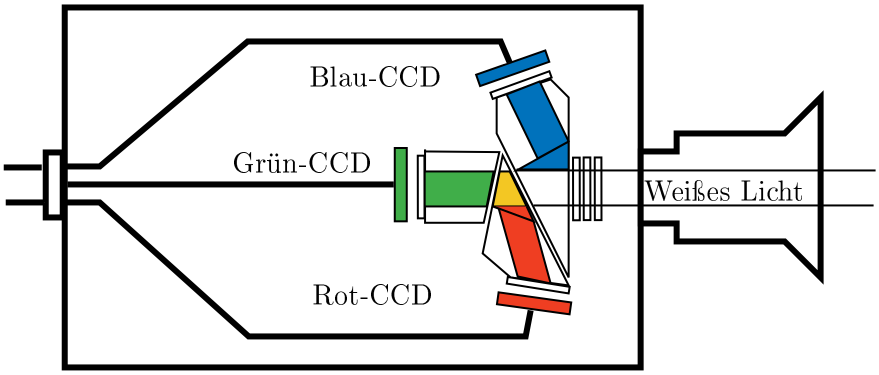

Abbildung 2.10.: Aufbau einer 3-Chip-CCD-Farbkamera.

Kamera eine höhere Auflösung als die 1-Chip-Variante mit gleichem CCD. Zudem kann es bei der 1-Chip-Variante durch die Interpolation zu Farbrauschen und zu Farbverschiebungen kommen. Daher werden für Anwendungen im Druckbereich, die eine hohe Farbtreue erfordern, fast ausschließlich 3-Chip-CCD-Kameras verwendet.

2.4.4. Die Programmierumgebung

Als Programmierumgebung wird das Microsoft Visual C++ Developer Studio 6.0 verwendet. Alle implementierten Routinen werden mit dem in dieses Produkt integrierten Compiler übersetzt und ausgewertet.

Zur Programmierung einer graphischen Oberfläche unter Microsoft Windows NT 4.0, die die implementierten Routinen einfach zugänglich macht, wurden gerätespezifische Funktionen angewandt, die nur schwer auf andere Systeme portierbar sind. Ebenso wurde zur Akquisition der Kamerabilder eine spezielle, mit der Grabberkarte gelieferte C-Bibliothek verwendet. Auch diese Routinen lassen sich nur schwer auf Systemen mit anderen Grabberkarten anwenden.

Bei der Implementation aller in dieser Arbeit verwendeten und beschriebenen bildverarbeitenden Algorithmen wurde allerdings darauf geachtet, daß diese in ANSI-C++ verwirklicht sind und damit leicht auf jede andere Programmierumgebung portiert werden können.

2.5. Der Ablauf der farbmetrischen Scannerkalibrierung

Die Firma Heidelberg Digital beschäftigt sich schon seit Jahren eingehend mit der farbmetrischen Scannerkalibrierung sowie der Einbindung von Scannern in Color-Management-Systeme und hat auf diesem Gebiet viel Erfahrung gesammelt (s. hierzu Abschnitt A.2 im Anhang). Dabei hat sich eine Vorgehensweise für die Kalibrierung etabliert und als praktikabel erwiesen, die in diesem Abschnitt erläutert werden soll. Eine genaue Darlegung dieser Vorgehensweise ist in der Patentschrift von G. Bestmann [23] zu finden.

2.5.1. Das ANSI-IT8 Farbtableau

Für das hier vorgestellte Verfahren wird ein Farbtableau benötigt. Ein Farbtableau, im folgenden auch Farbtafel genannt, ist eine Vorlage, auf der sich an festgelegten Orten genau festgelegte Farben befinden. Für die Scannerkalibrierung wird meist eine vom ANSI-Gremium international standardisierte Farbvorlage verwendet, die in Abbildung 2.11 dargestellt ist.

Dieses Farbtableau ist nach folgenden Gesichtspunkten aufgebaut: Im ersten Teil des Farbtableaus, den Spalten 1 bis 12, werden Farbfelder gewählt die möglichst gleichabständig über den CIE-L*a*b*-Farbraum verteilt sind. Die Grenzen der Farbdarstellung sind durch das Ausgabemedium für die Farbtafel, in den meisten Fällen Fotopapier, gegeben und werden bei der Verteilung der Farbfelder berücksichtigt. Die Spalten 1 bis 12 sind in drei Blöcke eingeteilt, die drei in etwa gleichabständige Helligkeitsstufen repräsentieren. In den Spalten eines jeden Blocks wird die Sättigung über

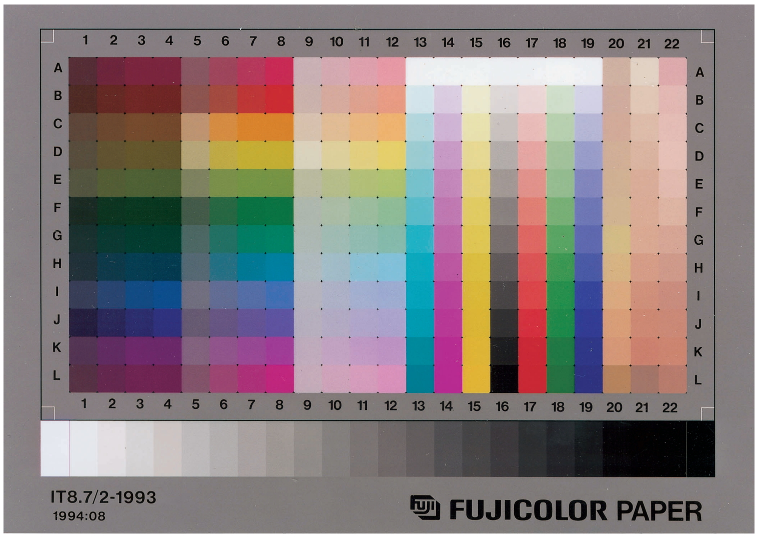

Abbildung 2.11.: Das ANSI-IT8 Farbtableau (z.B.von der Firma Fuji).

vier Stufen bis zur durch das Fotomedium vorgegebenen maximalen Sättigung variiert. Die Zeilen A-L Stellen jeweils gleichabständige Bunttonwinkel dar, der Buntton wird also ebenfalls in etwa gleichabständig verändert.

Im zweiten Teil des Tableaus, in den Spalten 13 bis 19, sind unterschiedlich gesättigte Grundfarben eingetragen. Dabei handelt es sich um die Basen des CIE-RGB- und des CIE-CMYK-Farbraumes. Im dritten Teil, den Spalten 20 bis 23 werden noch Problemfarben wie Haut- und Olivtöne eingetragen. Unter dem eigentlichen Tableau befindet sich ein 24-stufiger Graukeil, der einen gleichabständigen Übergang vom hellsten zum dunkelsten Grauton beschreibt, der mit dem Ausgabemedium erzeugt werden kann. Der genaue Aufbau des ANSI-IT8-Farbtableaus ist in [18] beschrieben.

2.5.2. Das Spektralphotometer und das Bezugssystem der Farbkalibrierung

Dieses Farbtableau ist als internationaler Standard festgelegt, dadurch sind die L*a*b*-Farbwerte der einzelnen Felder innerhalb der vom Ausgabemedium reproduzierbaren Farben fest vorgegeben. Um allerdings die durch verschiedene Ausgabemedien erzeugten Farbabweichungen von den Normwerten feststellen zu können, werden die Farbfelder vor der Kalibrierung spektralphotometrisch ausgemessen.

Ein Spektralphotometer ist ein Gerät, daß die Farbreizfunktion eines jeden Objektes unter Normlichtbedingungen mißt. Hierfür wird in dieser Arbeit das Normlicht D50 verwendet, dessen Spektralverteilung in Abbildung 2.1 dargestellt ist.

Die spektrale Resonanz des Farbfeldes unter diesem Standardlicht wird in Schritten von z.B. 10 nm gemessen. Aus dieser diskretisierten Farbreizfunktion wird die L*a*b*-Resonanz für das Feld unter dieser standardisierten Lichtart ermittelt.

Jede Farbkalibrierung bezieht sich somit auf eine fest vorgegebene Lichtart, und zwar die, unter der das Farbtableau spektralphotometrisch vermessen wurde. L*a*b*-Farbwerte sind nicht von sich aus kalibriert. Je nach der Lichtart, welche für die Kalibrierung verwendet wird, ändert sich die Repräsentation identischer Körperfarben im L*a*b*-Farbraum. Das Ziel der Kalibrierung ist damit, die Farben so erscheinen zu lassen, wie sie unter einer zuvor festgelegten Standardbeleuchtung erscheinen würden.

Das in dieser Arbeit zur Kalibrierung verwendete Normlicht D50 entspricht in etwa dem mittleren Tageslicht. Das bedeutet idealerweise, daß nach der Kalibrierung der Kamera alle Farben der aufgenommenen Objekte so erscheinen, wie sie unter der Beleuchtung mit Tageslicht aussähen.

2.5.3. Die Vorgehensweise der Scannerkalibrierung

Für die farbmetrische Kalibrierung wird die ANSI-IT8 Farbvorlage von dem zu kalibrierenden Scanner eingelesen, und es werden mittlere RGB-Farbwerte für die Scannerantwort auf die einzelnen Farbfelder berechnet. Dabei kann bei einem Scanner von einer gleichmäßigen Beleuchtung der gesamten Vorlage während des Scanvorganges ausgegangen werden.

Da die L*a*b*-Farbwerte der Farbfelder bekannt sind, existieren somit Stützstellen für die Umrechnung von Farbwerten aus dem vom Scanner verwendeten geräteabhängigen RGB-Farbraum in den vom Color-Management-System verwendeten geräteunabhängigen CIE-L*a*b*-Farbraum. Diese sind durch die Konstruktion der Farbtableaus möglichst gleichmäßig über den CIE-L*a*b*-Farbraum verteilt. Aus diesen Stützstellen wird nun durch Interpolation das Scannerprofil berechnet, das für diese Anwendung als Umrechnungsvorschrift von Scanner-RGB-Farbwerten in den CIE-L*a*b*-Raum dient.

Zunächst wird die Signalvorverzerrung des Scanners ermittelt. Dazu werden Stützstellen verwendet, die durch den Graukeil ermittelt werden, der sich im unteren Bereich des IT8-Tableaus befindet. Im Allgemeinen erzeugen die gleichabständigen Graufelder nicht gleichabständige Abtastwerte. Die vom Scanner eingehenden Signale werden linearisiert, um eine möglichst günstige Quantisierung für die folgende Look-Up-Operation zu erhalten.

Die darauf folgende nichtlineare Rechenvorschrift wird aus Gründen der Zeitersparnis als dreidimensionale Wertetabelle implementiert, in der für jeden linearisierten RGB-Farbwert der entsprechende L*a*b*-Farbwert „nachgeschlagen" werden kann. Diese Tabelle wird ausgehend von den gemessenen Stützwerten mittels eines Approximationsalgorithmus generiert.

Aus diesen Komponenten wird nun das Scannerprofil erstellt, das die Umrechnung von RGB-Scandaten in den CIE-L*a*b*-Raum beschreibt. Dieses Profil ist für den Scanner konstant, solange sich die Umgebungsverhältnisse zwischen zwei Scanvorgängen nicht ändern. Da dies bei Scannern i.A. erst mit einer Alterung der Lichtquelle der Fall ist, kann ein Profil über einen langen Zeitraum für jeden folgenden Scanvorgang mit genau diesem Scanner verwendet werden. Es reicht also aus, für einen Scanner genau ein Profil zu generieren, das für alle späteren Scanvorgänge angewandt werden kann.

2.5.4. Unterschiede zwischen Videokamera- und Scannerkalibrierung

Bei der Kalibrierung einer Videokamera existiert im Vergleich zur Scannerkalibrierung das folgende Problem. Es ist nur schwer möglich, Annahmen über die Umweltgegebenheiten in das Verfahren einfließen zu lassen, da diese wesentlich variabler als bei einem Scanner sind. Das Farbtableau ist i.A. ungleichmäßig ausgeleuchtet, oder die Ausleuchtung ist nicht identisch mit der des später aufgenommenen Gegenstandes. Zusätzlich ist es nicht möglich, ein universell wiederverwendbares Kameraprofil zu erstellen, da die Umweltbedingungen zwischen verschiedenen Aufnahmen sehr stark voneinander abweichen können. Es muß also für jede Aufnahme eine neue Kalibrierung erfolgen oder zumindest die bestehende Kalibrierung teilweise angepaßt werden.

Daraus ergeben sich folgende Anforderungen an ein System zur Videokamerakalibrierung:

- Die Kalibrierung muß schnell und einfach durchzuführen sein, damit sie gegebenenfalls vor jeder Aufnahme einer Videosequenz kurzfristig wiederholt werden kann.
- Das System muß fortwährend die Umwelteinflüsse überwachen und eine automatische Anpassung an die auftretenden Veränderungen vornehmen.

2.6. Das standardisierte ICC-Geräteprofil

Um Kompatibilität zwischen verschiedenen Geräteherstellern von Color-Management-Systemkomponenten zu gewährleisten, wurde im Jahr 1994 vom ICC ein einheitlicher Standard für Geräteprofile verabschiedet. An diesen wird sich auch die folgende Videokamerakalibrierung halten. An dieser Stelle soll nur kurz umrissen werden, was ein Geräteprofil ist und wie es verwendet wird. Der genaue Aufbau des ICC-Profils ist in der Spezifikation dieses Standards [19] nachzulesen.

Der Konstruktion eines ICC-Geräteprofils liegt die Struktur eines Color-Management-Systems zugrunde. Diese Struktur soll zunächst erläutert werden. Es wird davon ausgegangen, daß ein solches System aus Eingabegeräten, wie z.B. Scannern oder Digitalkameras, und Ausgabegeräten, wie z.B. Druckmaschinen oder Monitoren, besteht. Für die Eingabegeräte werden Eingabeprofile und für die Ausgabegeräte entsprechend Ausgabeprofile erstellt. Die Eingabeprofile enthalten eine Umrechnungsvorschrift für Farbdaten aus dem geräteabhängigen Farbraum des Eingabegerätes in einen geräteunabhängigen Farbraum, dem PCS (Profile Connection Space). Die Ausgabeprofile enthalten umgekehrt die Umrechnung aus dem PCS in den Farbraum des Ausgabegerätes.

Der PCS ist standardgemäß immer einer der bereits erläuterten geräteunabhängigen Farbräume CIE-XYZ oder CIE-L*a*b*. Über diesen PCS werden die Geräte miteinander verknüpft. Es existiert also ein definierter Zustand, in dem sich alle Farbdaten einmal während Umrechnung befinden und der es möglich macht, beliebige Ein- und Ausgabegeräte miteinander zu verknüpfen.

Für Farbumrechnungsvorschriften sind in den Profilen vielfältige Möglichkeiten vorgesehen. So ist es z.B. möglich, die Farbraumtransformation einfach mittels einer

3×3 - Matrix vorzunehmen oder mittels drei eindimensionalen Wertetabellen, mit denen die drei Farbkanäle separat transformiert werden. Auch eine dreidimensionalen Look-Up-Tabelle ist vorgesehen, die für jedes Farbtripel aus dem Eingabefarbraum ein entsprechendes Farbtripel im Ausgabefarbraum enthält. Diese drei Möglichkeiten können beliebig kombiniert werden, so kann es z.B. nützlich sein, den Dynamikumfang des Kamerabildes durch die Verwendung von drei eindimensionalen Wertetabellen anzupassen, oder ein schon bearbeitetes Bild durch eine lineare Transformation mit einer 3×3 - Matrix nachträglich zu korrigieren. Diese beiden Verfahren werden in dieser Arbeit verwendet und in späteren Abschnitten (6.1 und 6.2) erläutert.

Die Profilspezifikation liefert somit schon die Rahmenbedingungen für ein Color-Management-System. Die vorliegende Arbeit hält sich weitgehend an diesen Rahmen. Es wird zur Kalibrierung ein Geräteprofil für die Videokamera erstellt, das sich an den Vorgaben des ICC-Standards orientiert. Dieses wird innerhalb der Grenzen, die dieser Standard vorgibt automatisch an Beleuchtungsänderungen angepaßt. Es existiert also zu jeder Zeit ein standardkonformes Geräteprofil für die aktuelle Beleuchtungsbedingung, das die Umrechnung aus dem Kamera-RGB-Raum in den CIE-L*a*b*-Raum beschreibt. Dieser wird in der vorliegenden Arbeit als PCS verwendet.

Der Zweck eines Geräteprofils bei der Scannerkalibrierung ist die Abbildung vom Hersteller bereits hardwaremäßig kalibrierter Scandaten in einen definierten Zustand im PCS. Durch die Profilierung von Scandaten werden die gerätespezifischen Eigenschaften des verwendeten Scanners beschrieben. Die eigentliche Kalibrierung des Scanners findet allerdings bereits bei dessen Konstruktion statt. Damit sind die Begriffe Kalibrierung und Profilierung für Scanner eindeutig zu trennen. Bei der Kalibrierung einer Videokamera liegt allerdings aufgrund der Variabilität der beeinflussenden Parameter i.A. kein feststehender Ausgangszustand vor. Hier wird sowohl die Kalibrierung als auch die Profilierung softwaremäßig mit einem einzigen Profil durchgeführt, wodurch diese beiden Schritte nicht eindeutig zu trennen sind. Daher werden die Begriffe in dieser Arbeit synonym verwendet.

3. Ein Verfahren zur farbmetrischen Kalibrierung einer Videokamera

Im vorliegenden Kapitel wird die Vorgehensweise der Videokamerakalibrierung beschrieben, wie sie in dieser Diplomarbeit entwickelt und angewandt wird.

Dazu wird zunächst in Abschnitt 3.1 der Ablauf einer solchen Kalibrierung beschrieben, ohne auf die Details der Algorithmen einzugehen. In Abschnitt 3.2 wird die für die farbmetrische Videokamerakalibrierung erstellte Farbtafel dargestellt und die bei der Konstruktion dieser Tafel berücksichtigten Parameter erläutert. In den darauf folgenden Kapiteln wird auf die einzelnen Teilschritte des Kalibrierablaufes, die in Abschnitt 3.1 kurz angesprochen werden, nacheinander detailliert eingegangen.

3.1. Die Vorgehensweise der farbmetrischen Videokamerakalibrierung

Bei der in dieser Arbeit untersuchten Videokamerakalibrierung wird von dem in Abschnitt 2.5.3 erläuterten Verfahren für die farbmetrische Scannerkalibrierung ausgegangen. Dieses Verfahren wird allerdings auf die neue Aufgabe angepaßt und dabei grundlegend modifiziert.

Das implementierte Kalibrierverfahren arbeitet ebenfalls mit einem Farbtableau, das von der Kamera aufgenommen wird. Da sich das für die Scannerkalibrierung verwendete standardisierte ANSI-IT8-Farbtableau (s. Abschnitt 2.5.1) als nicht für die Kamerakalibrierung geeignet erwiesen hat, wird ein speziell auf die Anforderungen der Videokamerakalibrierung angepaßtes Farbtableau entwickelt, das im folgenden Abschnitt 3.2 beschrieben wird. Dieses Tableau wird ebenfalls, identisch zur Vorgehensweise bei der Scannerkalibrierung, mit einem Spektralphotometer unter der Normlichtart D50 ausgemessen (s. Abschnitt 2.5.2), um so die genauen L*a*b*-Referenzfarbwerte der einzelnen Felder des Tableaus bestimmen zu können.

Der Ablauf der Kamerakalibrierung besteht aus zwei separaten Schritten:

1. Im ersten Schritt wird die Kamera zunächst auf die momentanen Beleuchtungsverhältnisse kalibriert. Dazu nimmt man das Farbtableau als Standbild auf, um dieses dann aus dem Kamerabild zu extrahieren. Aus dieser Aufnahme wird ein *initiales Kameraprofil* berechnet, das die Beleuchtungsverhältnisse und die speziellen Eigenschaften der Farbrezeption der Videokamera zum Zeitpunkt der Standbildaufnahme beschreibt. Dieses so generierte Profil würde für eine Kamerakalibrierung unter zeitlich konstanten und für alle Bildbereiche homogenen

Beleuchtungsverhältnissen genügen. Dieser Schritt der Kalibrierung dient ausschließlich dazu, die speziellen Eigenschaften der Farbrezeption der Videokamera zu neutralisieren (vgl. Abschnitt 2.2). Eine Kalibrierung der Beleuchtungsverhältnisse wird nur für die bei der Profilaufnahme vorherrschende Beleuchtung realisiert.

2. Im zweiten Schritt wird das initiale Kameraprofil dann automatisch an variierende Beleuchtungsbedingungen angepaßt. Dazu wird zunächst das im ersten Schritt erstellte initiale Kameraprofil auf die Kamerabildfolge angewandt, und die auf diese Weise farbmetrisch kalibrierten Kamerabilder werden ausgegeben. Während der Darstellung des Videobildstroms überwacht der Rechner im Hintergrund die dargestellte Szenerie und mißt eventuelle Beleuchtungsänderungen. Wird eine Beleuchtungsänderung festgestellt, dann wird die Kalibrierung auf die neue Lichtart angepaßt, so daß im Idealfall die Farben der Szenerie trotz der Lichtänderung vollständig beleuchtungsinvariant dargestellt werden.

Die Algorithmen, die im Rahmen dieses Kalibrierablaufes zur Anwendung kommen, sind in den folgenden Kapiteln 4, 5 und 6 detailliert erläutert. Beim Lesen dieser Kapitel sollte aber dennoch zur besseren Übersicht die Einordnung der einzelnen Algorithmen in den oben gegebenen groben Ablauf vorgenommen werden können. Dazu sei an dieser Stelle noch einmal kurz auf den Inhalt der folgenden Kapitel eingegangen.

Der weiter oben als erster Schritt des Algorithmus bezeichnete Ablauf wird in den Kapiteln 4 und 5 detailliert beschrieben. Dabei beschreibt Kapitel 4 die Extraktion des Farbtableaus aus einem Kamerabild und damit die Generierung von Stützstellen zur Umrechnung von Kamerawerten in Normfarben. Daraufhin erläutert Kapitel 5 ausgehend von diesen in Kapitel 4 erzeugten Stützstellen die Generierung eines initialen Kameraprofils.

Der zweite Schritt des Algorithmus wird in Kapitel 6 erläutert. In diesem Schritt wird nicht das komplette Kameraprofil neu berechnet, da dies in Videoechtzeit nicht annähernd möglich wäre, sondern es wird, ausgehend vom initialen Kameraprofil, eine Adaption an die aktuelle Beleuchtung vorgenommen.

Durch die Zweiteilung des Algorithmus ergeben sich für die Auswertung der Kalibrierung in Kapitel 8 zwei unterschiedliche Ansätze. Zum einen wird die Qualität der Kalibrierung untersucht, wenn das initiale Kameraprofil nur ein einziges Mal unter einer einzigen Beleuchtung erstellt und als initiales Kameraprofil für alle folgenden Kalibriervorgänge mit derselben Kamera wiederverwendet wird. Bei nachfolgenden Kalibriervorgängen wird in diesem Fall ausschließlich der Schritt zwei angewandt und das bestehende Profil wird entsprechend den vorhandenen Beleuchtungsbedingungen angepaßt.

Der zweite Ansatz führt eine ähnliche Untersuchung durch, nur daß in diesem Fall das initiale Kameraprofil direkt vor der Kalibrierung erstellt wird und damit den bestehenden Lichtverhältnissen besser entspricht. Die adaptive Kalibrierung kommt in diesem Ansatz nicht zur Anwendung.

Zunächst soll aber der Aufbau des im Rahmen dieser Diplomarbeit erstellten Farbtableaus zur Kalibrierung einer Videokamera beschrieben und erläutert werden.

3.2. Das verwendete Videokamera-Farbtableau

Im Rahmen dieser Arbeit ist ein Farbtableau entwickelt worden, das auf die speziellen Anforderungen der Kalibrierung einer Video- oder Digitalkamera zugeschnitten ist und damit einige Merkmale aufweist, die es von den bisher gängigen Farbtafeln abheben.

Das standardisierte IT8-Tableau aus Abbildung 2.11 ist zur Videokamerakalibrierung erwartungsgemäß nicht geeignet, da die kleinen Farbfelder bei einer Kameraauflösung von 752×582 Punkten und bei nur geringen Farbunterschieden zwischen den einzelnen Feldern kaum robust extrahiert werden können. Außerdem kann eine mögliche ungleichmäßige Ausleuchtung des Tableaus nicht festgestellt werden, da entsprechend verteilte, gleichfarbige Testfelder auf der Tafel fehlen.

Daher ist ein spezielles Kamera-Testtableau notwendig, das den Anforderungen der variablen Umgebungssituation entsprechen kann und aus dem, auch unter perspektivischer Verzerrung, die Farbfelder robust extrahiert werden können. Das unter diesen Gesichtspunkten entwickelte Testtableau ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

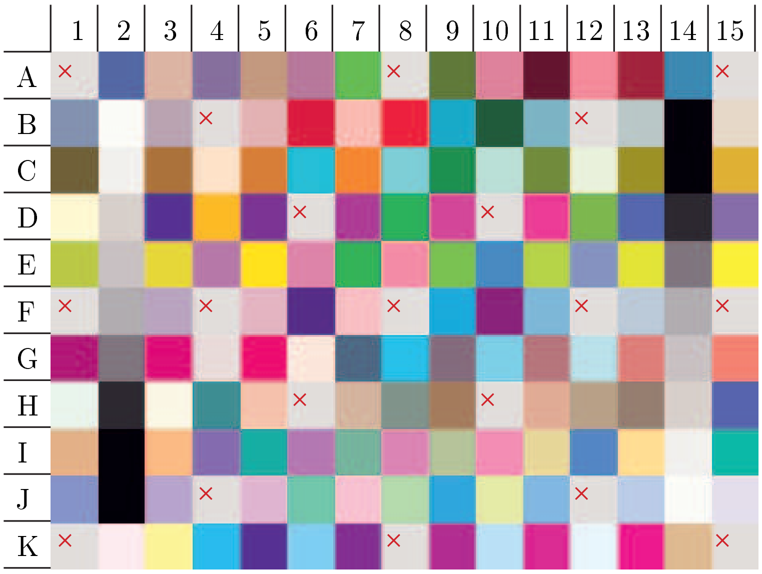

Abbildung 3.1.: Das selbsterstellte Kamera-Testtableau.

Bei der Entwicklung dieses Testtableaus wurden einige Überlegungen berücksichtigt, die näherer Erläuterungen bedürfen.

So sollte eine möglichst gleichmäßige Verteilung der spektralphotometrisch gemessenen Farbwerte der Farbfelder im CIE-L*a*b*-Farbraum angestrebt werden, um homogen verteilte Stützstellen zu erhalten. Damit wird die Interpolation der nicht durch Stützstellen abgedeckten Farbwerte optimiert. Desweiteren hatten ausführliche experimentelle Untersuchungen mit unterschiedlichen Farbtableaus und variierenden Farbfeldverteilungen den größten Einfluß auf den Aufbau des Tableaus.

Die Verteilung der spektralphotometrisch gemessenen Farbwerte des Testtableaus im CIE-L*a*b*-Raum ist in Abbildung 3.2 in Projektionen auf die jeweiligen Koordinatenebenen des Farbraumes dargestellt. Man erkennt die homogene Verteilung der Stützstellen, die konvexe Hülle der Farben wird durch das Druckmedium vorgegeben, daß nach der Konstruktion des CIE-L*a*b*-Raumes diesen nicht vollständig darstellen kann. In die L*-a*- und die L*-b*-Darstellung die Unbuntgerade eingetragen.

Wichtig für eine robuste und gegenüber perspektivischen Verzerrungen stabile Extraktion der einzelnen Farbfelder ist zudem die Erzeugung starker Farbunterschiede zwischen angrenzenden Feldern. Dazu sind diese nach Möglichkeit so angeordnet, daß benachbarte Felder sich wesentlich in der Farbe unterscheiden. Das Tableau sieht dadurch ungeordnet aus, es ergeben sich aber deutliche Vorteile bei der eindeutigen

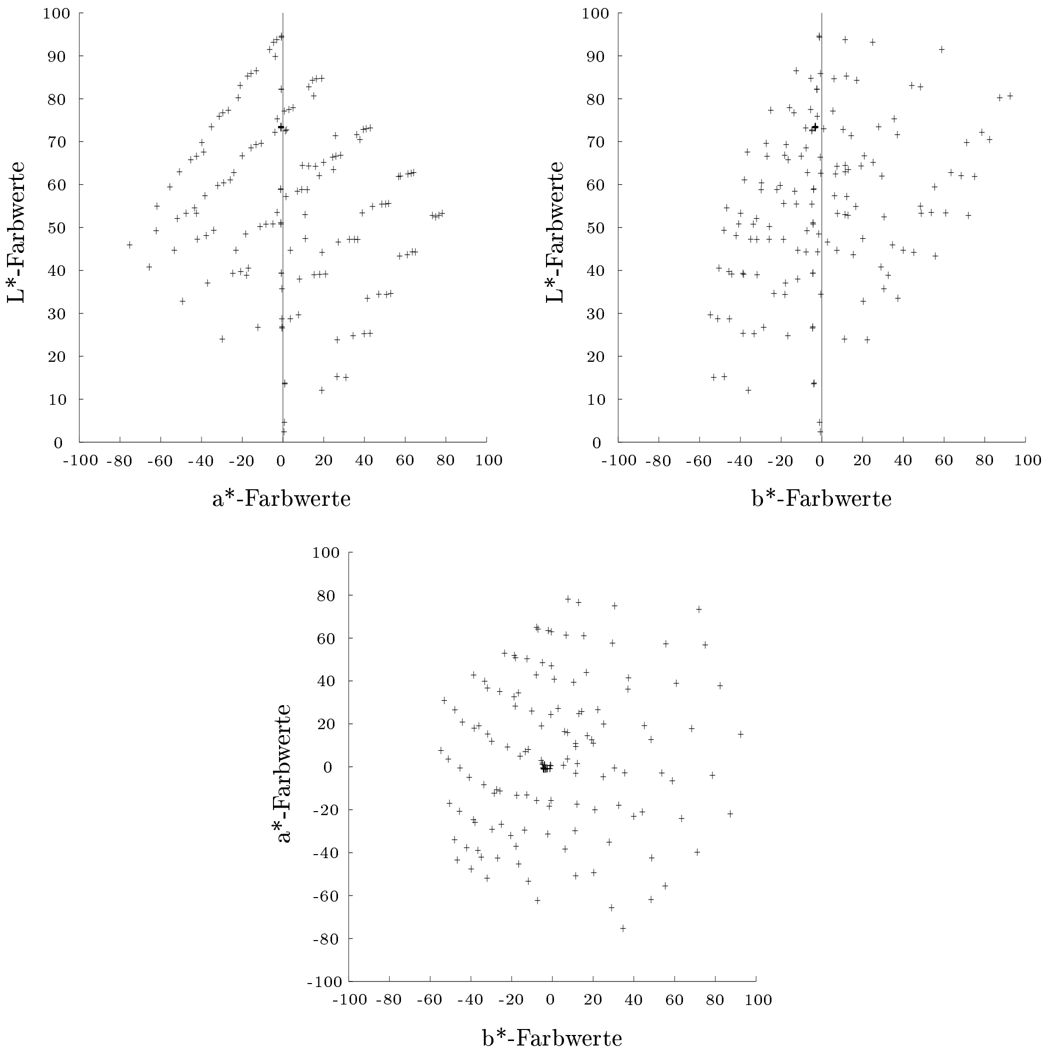

Abbildung 3.2.: Verteilung der Farbfelder der selbsterstellten Farbtafel im CIE-L*a*b*-Farbraum, dargestellt sind die spektralphotometrisch gemessenen L*a*b*-Werte in der Projektion auf die drei Koordinatenebenen.

Extraktion der Feldgrenzen. Desweiteren wurde die Anzahl der Farbfelder gegenüber dem IT8-Tableau reduziert, so daß die Felder eine Größe aufweisen, die eine sichere Extraktion ermöglichen.

Ein optisch besonders auffälliges Merkmal für eine schlechte farbmetrische Kalibrierung sind Farbstiche in unbunten Farben. Daher ist es sinnvoll, Grautöne auf dem Farbtableau überproportional häufig darzustellen. Um für diese unbunten Farben besonders verläßliche Stützstellen zu erhalten, werden Graufelder auf beiden Seiten des Farbtableaus angeordnet. Auffällig sind ebenfalls schlechte Kalibrierergebnisse im Bereich der Hautfarben und Oliv- sowie Brauntönen. Farbfelder in diesen Farben kommen, wie auch auf der ANSI-IT8 Farbtafel (siehe Abschnitt 2.11), überproportional häufig auf dem hier erstellten Tableau vor.

Als letzter wichtiger Gesichtspunkt ist eine gleichmäßige Verteilung von identisch gefärbten Graufeldern über das Tableau nötig, um Beleuchtungsunterschiede in den verschiedenen Regionen des Farbtableaus detektieren und kompensieren zu können. Die Farbe dieser Felder ist grau und nicht weiß gewählt, wie man es vielleicht erwarten würde. Weiße Felder erzeugen bei einer Blendenöffnung, die ein optisch ansprechendes unkalibriertes Bild liefert, auf allen drei Kanälen der RGB-Kameraantwort das maximale Antwortsignal. Ein stabiler Beleuchtungsableich wäre damit nicht möglich. Die Graufelder zum Beleuchtungsausgleich sind in Abbildung 3.1 mit einem 'x' markiert. Diese Markierungen sind auf der verwendeten Originalfarbtafel nicht abgebildet und sollen nur die Lage der Graufelder verdeutlichen.

Aus den vorhergehenden Überlegungen und zahlreichen Untersuchungen ist das in Farbtableau für die farbmetrische Kalibrierung einer Videokamera entstanden. Alle in den folgenden Kapiteln durchgeführten Untersuchungen beziehen sich auf dieses Farbtableau.

Um mit dieser Farbtafel ein gutes initiales Kameraprofil zu erzeugen, sollte die Aufnahme des Tableaus sorgfältig durchgeführt werden. Es ist dabei sehr wichtig, auf eine korrekte Einstellung der Kamerablende zu achten. Der Dynamikbereich der RGB-Videokamera sollte möglichst vollständig genutzt werden, allerdings sollte es vermieden werden, das Bild überzubelichten. Überbelichtung bedeutet hierbei, daß die weißen Felder des Farbtableaus für einen einzigen Farbkanal einen RGB-Wert von 255 aufweisen. Schon in diesem Fall erfolgt eine Kappung der hellen Werte bei der Kalibrierung, und das Kameraprofil wird für die hellen Bildbereiche ungenau. Die Blendenöffnung der Kamera sollte vor der Profilgenerierung so eingestellt sein, daß das verwendete Standbild diesen Forderungen genügt.

Ein Original des Farbtableaus ist im Anhang unter Abschnitt A.4 zu finden. Mit Hilfe dieses Originaltableaus ist es unter Verwendung eines geeigneten Computersystems und der im Zuge dieser Arbeit erstellten Kalibriersoftware möglich, eine Videokamerakalibrierung durchzuführen. Im Anhang in Abschnitt B.3 sind die spektralphotometrisch gemessenen Farbwerte der Felder zur genaueren Beschreibung des Tableaus tabellarisch aufgeführt.

4. Generierung der Stützstellen zur Profilberechnung

Gegenstand dieses Kapitels ist die Generierung von Stützstellen der Profilierungsfunktion zur Umrechnung von Farbwerten aus dem Kamera-RGB-Raum in den geräteunabhängigen CIE-L*a*b*-Farbraum.

Um verläßliche Stützstellen zu erhalten, muß zunächst einmal das Farbtableau fehlerfrei aus dem Kamerabild extrahiert werden. Anschließend werden mittlere Farbwerte der einzelnen Felder des Tableaus bestimmt (Abschnitt 4.1). Auf diese mittleren Farbwerte wird nachfolgend ein Algorithmus angewandt, der mögliche Beleuchtungsunterschiede anhand der gleichmäßig auf dem Farbtableau verteilten Graufelder kompensiert. Die Werte werden so umrechnet, als läge eine homogene Beleuchtung über das gesamte Farbtableau vor (Abschnitt 4.2). Die auf diese Weise erzeugten Stützstellen werden zur Erstellung eines Kameraprofils mittels eines Interpolationsalgorithmus benötigt. Die Interpolation wird in Kapitel 5 beschrieben.

4.1. Die Extraktion des Farbtableaus

Das Ziel der Extraktion des Farbtableaus ist es, die Grenzen jedes einzelnen Farbfeldes im Bild genau zu bestimmen. Die Kenntnis der zu einem Farbfeld gehörenden Pixel ermöglicht die Berechnung der mittleren Kamera-RGB-Antwort für dieses Feld.

Dazu wird zunächst das Farbtableau aus Abschnitt 3.2 von der Kamera in einem Standbild aufgenommen, auf dem die Extraktion durchgeführt wird. Der Anwender muß bei der Aufnahme darauf achten, daß das Tableau komplett im Bild dargestellt ist und mehr als die Hälfte der Bildfläche ausfüllt. Dabei ist keine bestimmte Tableauorientierung zu beachten, da der Algorithmus rotationsinvariant arbeitet. In Abbildung 4.1 ist eine Aufnahme des Tableaus dargestellt, die in diesem Abschnitt als Beispiel für die Extraktion verwendet wird. Um das Farbtableau aus einem solchen Bild zu extrahieren werden einige Standardverfahren aus der Bildverarbeitung angewandt.

Die Grenzen der Farbfelder stellen in jedem der drei RGB-Farbkanäle Grauwertkanten dar und können mit der Hough-Transformation [21] zur Detektion von Geraden extrahiert werden. Im Abschnitt 4.1.2 wird die in dieser Arbeit verwendete die Hough-Transformation näher erläutert, sie ist in einer Form implementiert, die von Pauli [34] entwickelt wurde. Da das Ergebnis der Hough-Transformation sehr stark von einer geeigneten Vorverarbeitung des Bildes abhängt, wird hierzu der in Abschnitt 4.1.1 erläuterte Canny-Operator [24] angewandt, der sich für diesen Zweck als besonders vorteilhaft erwiesen hat.

Abbildung 4.1.: Beispielaufnahme für ein zu extrahierendes Farbtableau.

Die Hintereinanderausführung dieser beiden Verfahren ergibt eine Geradenschar, die im Idealfall genau den farbfeldbegrenzenden Geraden entspricht. Da dieser Idealfall nur selten eintritt, schließt sich an die Ausführung dieser beiden Operatoren eine Heuristik an (Abschnitt 4.1.3), die aus der Geradenschar die irrelevanten Geraden aussortiert und ggf. fehlende Geraden interpoliert.

An dieser Stelle des Algorithmus sollten alle farbfeldbegrenzenden Geraden bekannt sein. Nun kann, wie in Abschnitt 4.1.4 dargestellt, leicht der mittlere Farbwert jedes Feldes errechnet werden.

4.1.1. Der Canny-Operator

Der Canny-Operator wurde erstmals 1986 von J.F. Canny [24] veröffentlicht und zunächst nur für Grauwertbilder definiert. Bereits 1987 erweiterte Kansade [25] den Operator auf Farbbilder, indem der vektorielle Gradient des Bildes mit Hilfe der Jacobimatrix aus den partiellen örtlichen Ableitungen der drei Farbkanäle gebildet wird. Dieser Ansatz wird hier, aufgrund der hohen Rechenleistung, die zur Kantenextraktion benötigt würde, nicht verfolgt. Die zu lösende Segmentierungsaufgabe ist zu gutartig, um die Anwendung allzu komplexer Verfahren zu rechtfertigen. Auch mit dem einfachen Canny-Operator für Grauwertbilder läßt sich eine robuste Segmentierung erreichen. Der Operator wird hier in einer leicht abgewandelten Form implementiert, die sich an der in [4] vorgestellten Variante des Canny-Algorithmus orientiert.

Bei der Anwendung des Canny-Operators für Grauwertbilder kann auf Farbbildern jeweils nur einer der drei Farbkanäle separat transformiert werden. Im folgenden bezieht sich der Ausdruck „Bild" daher auf einen beliebigen der drei Farbkanäle des Kamerabildes.

Sei also f ein beliebiger Farbkanal des Kamerabildes. Dann werden in einem ersten Schritt die Richtungsableitungen von f in x- und y-Richtung in jedem Punkt $f^{i,j}$ berechnet. Das Bild wird mit den entsprechenden Soble-Operatoren, also den Faltungsmasken

$$h^x = \frac{1}{8}\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{und} \quad h^y = \frac{1}{8}\begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

gefaltet. Daraus ergeben sich zwei Kantenbilder g_x und g_y, die den Gradientenbetrag an jeder Pixelposition $f^{i,j}$ in x- bzw. in y-Richtung beschreiben. Es gilt

$$|\nabla_x f| = h^x * f \quad \text{und} \quad |\nabla_y f| = h^y * f\,. \tag{4.2}$$

Aus diesen beiden Bildern berechnet der Canny-Operator in einem zweiten Schritt zwei Bilder $|\nabla f|$ und $\Theta_{\nabla f}$, definiert durch

$$\begin{aligned} |\nabla f| &= \sqrt{|\nabla_x f|^2 + |\nabla_y f|^2} \qquad \text{und} \\ \Theta_{\nabla f} &= \begin{cases} \arctan \frac{|\nabla_y f|}{|\nabla_x f|} & \text{falls } |\nabla_x f| \neq 0 \\ -\frac{\pi}{2} & \text{sonst.} \end{cases} \end{aligned} \tag{4.3}$$

Dabei repräsentiert $|\nabla f|$ den richtungsunabhängigen Gradientenbetrag des Bildes f, $\Theta_{\nabla f}$ stellt die Gradientenrichtung von f in jedem Punkt dar. Für die Gradientenrichtung $\Theta_{\nabla f}$ gilt in jedem Punkt $\Theta_{\nabla f}^{i,j} \in [-\frac{\pi}{2}, \dots, \frac{\pi}{2}[$. Eine Gradientenrichtung von $\Theta_{\nabla f}^{i,j} = -\frac{\pi}{2}$ bzw. $\Theta_{\nabla f}^{i,j} = \frac{\pi}{2}$ deutet an, daß eine mögliche Kante im Bild f an der Stelle (i,j) parallel zur x-Achse verläuft, eine Gradientenrichtung von $\Theta_{\nabla f}^{i,j} = 0$ weist auf eine mögliche Kante bei (i,j) parallel zur y-Achse hin.

Als dritter Schritt wird auf $|\nabla f|$ eine Erosion in Gradientenrichtung, also senkrecht zu einer möglichen Kante in f, durchgeführt. Die Gradientenrichtung ist dabei bereits durch $\Theta_{\nabla f}$ gegeben. Alle Pixel in $|\nabla f|$, die kein lokales Maximum in Gradientenrichtung darstellen, werden gelöscht. Um dieses zu erreichen, wird die Gradientenrichtung folgendermaßen in vier Hauptrichtungen eingeteilt:

3	0	1
2	x	2
1	0	3

0 für $\Theta_{\nabla f}^{i,j} \in [-\frac{1}{2}\pi, \dots, -\frac{3}{8}\pi[\cup [\frac{3}{8}\pi, \dots, \frac{1}{2}\pi[$,
1 für $\Theta_{\nabla f}^{i,j} \in [-\frac{3}{8}\pi, \dots, -\frac{1}{8}\pi[$,
2 für $\Theta_{\nabla f}^{i,j} \in [-\frac{1}{8}\pi, \dots, \frac{1}{8}\pi[$,
3 für $\Theta_{\nabla f}^{i,j} \in [\frac{1}{8}\pi, \dots, \frac{3}{8}\pi[$

Jeder Bildpunkt $|\nabla f^{i,j}|$ aus $|\nabla f|$ wird mit den beiden Punkten aus seiner 8-Nachbarschaft verglichen, die auf der Geraden liegen, welche in Gradientenrichtung $\Theta_{\nabla f}^{i,j}$ verläuft. Dabei wird $|\nabla f^{i,j}|$ auf 0 gesetzt, falls einer dieser beiden Nachbarn einen höheren Betrag aufweist.

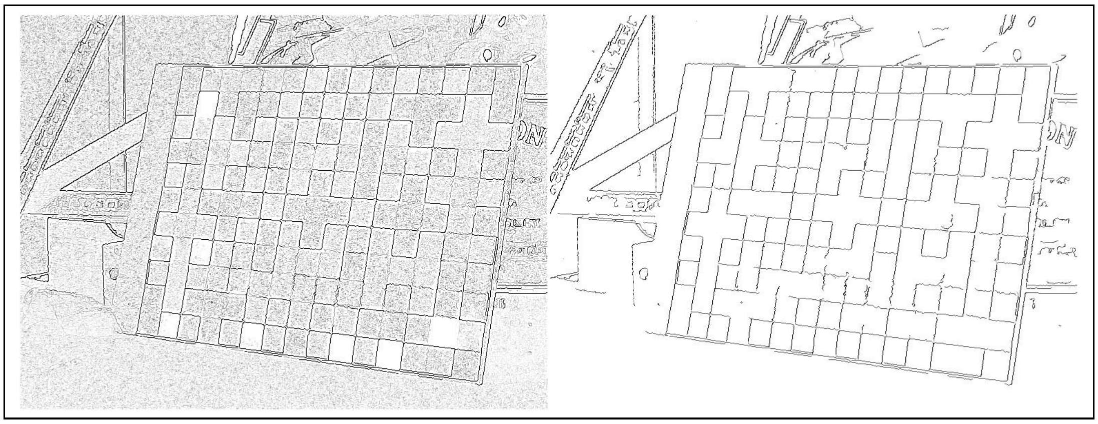

Abbildung 4.2.: Beispiel für eine zu extrahierende Farbtafel nach Anwendung des Canny-Operators (linkes Bild) und nach zusätzlicher Anwendung des doppelten Schwellwertoperators (rechtes Bild).

Als Ergebnis erhält man ein Bild m mit genau einem Pixel breiten Kanten an den lokalen Maxima des Gradienten. Wird beispielsweise der Blaukanal des in Abbildung 4.1 dargestellten Kamerabildes entsprechend transformiert, entsteht das linke Bild der Abbildung 4.2. Dieses Bild ist verstärkt dargestellt, damit auch die schwachen Kanten sichtbar sind.

Auf dieses Bild wird anschließend ein doppelter Schwellwert gekoppelt mit einem Konturfolgeoperator angewandt, der nach folgendem Prinzip arbeitet.

Zunächst werden zwei Schwellen t_h und t_l mit $t_h > t_l$ gewählt. Im bisher erzeugten Kantenbild m wird nach einem Bildpunkt gesucht, dessen Betrag die obere Schwelle t_h überschreitet. Da die gefundene Kante nur ein Pixel breit sein kann, bietet sich die Benutzung eines Konturfolgeoperators an, der den so gefundenen Konturpunkt als Konturbeginn weiterverfolgt und so lange im Uhrzeigersinn an der Kontur entlangwandert, bis kein neuer Konturpunkt in der 8-Nachbarschaft des aktuellen Aufpunktes gefunden werden kann, der t_h überschreitet. Dann wird in der Nachbarschaft ein Bildpunkt gesucht, dessen Betrag größer ist, als die zweite Schwelle t_l. Wird ein solcher gefunden, dann wird die Kontur entlang dieses Punktes entsprechend weiterverfolgt. Überschreitet ebenfalls kein benachbartes Pixel t_l, wird versucht, ein Pixel zu überspringen und die Kontur jenseits der Lücke weiterzuverfolgen. Dabei wird die Konturlücke geschlossen. Sollte auch dieser Versuch scheitern, sucht der Algorithmus im gesamten Bild m nach einem neuen Konturanfang, also einem beliebigen Bildpunkt $m^{i,j}$ der noch nicht besucht worden ist und dessen Betrag t_h übersteigt. Um mehrmalige Verfolgung derselben Bildpunkte auszuschließen, werden die bereits gefundenen Konturpunkte geeignet markiert.

Da das Ziel dieses Algorithmus die Erstellung eines Bildes ist, auf dem die Hough-Transformation zur Geradendetektion angewandt werden soll, versucht der Konturfolgealgorithmus primär solche Konturen zu finden und zu schließen, die entlang einer Geraden verlaufen. Konturpunkte, die nicht in der aktuellen Konturfolgerichtung liegen, werden nur mit niedriger Priorität als Folgepunkt gewählt. Damit werden schon an dieser Stelle primär gerade verlaufende Kanten, also Geraden, extrahiert. Aus dem Bild m, Abbildung 4.2 (links), entsteht auf diese Weise das Bild t, welches Abbildung 4.2 (rechts) dargestellt ist.

Damit ist die Vorverarbeitung abgeschlossen, auf das so erzeugte Gradientenbetragsbild t wird im folgenden Abschnitt die Hough-Transformation zur Geradendetektion angewandt.

4.1.2. Die Hough-Transformation zur Geradendetektion

Die allgemeine Hough-Transformation [21] ist ein Verfahren zur Detektion von parametrisierbaren Kurven in einem Binärbild. Das Problem des Auffindens einer solchen Struktur im Bildraum wird transformiert in das Problem einer Maximumsuche im Parameterraum, die oft erheblich einfacher durchzuführen ist. Prinzipiell lassen sich alle Objekte durch die Hough-Transformation detektieren, die sich durch eine Parameterkurve beschreiben lassen. Hier soll allerdings nur der einfache Fall der Hough-Transformation zur Detektion von Geraden beschrieben werden.

Um eine Gerade im Hough-Raum beschreiben zu können, müssen einige zusätzliche Vereinbarungen getroffen werden. Zunächst muß die Bildgröße des Bildes t aus Abschnitt 4.1.1 ermittelt und ein Ursprung im Bild festgelegt werden. Sei also $t^{i,j}$ ein Bildpunkt von t mit $(i,j) \in [0,\ldots,N_i-1] \times [0,\ldots,N_j-1]$. Der Ursprung kann beliebig gewählt werden und wird hier mit $U = (U_i, U_j) = (\frac{N_i}{2}, \frac{N_j}{2})$ festgelegt. Mit dieser Festlegung kann die Parameterdarstellung einer Geraden durch

$$g(\omega, r, i, j) = (i - U_i)\cos(\omega) + (j - U_j)\sin(\omega) - r \tag{4.4}$$

angegeben werden. Dabei bilden $(i,j) \in \mathbb{R}^2$ den Bildraum X und $(\omega, r) \in \mathbb{R}^2$ den Parameterraum Ω. Der Parameter ω ist der Winkel zwischen der x-Achse und der dargestellten Geraden, $|r|$ ist der Abstand dieser Geraden zum Ursprung U. Da der Bildraum durch die Ausdehnung des Bildes t beschränkt ist, gilt für r durch die Wahl des Bildursprunges U in der Bildmitte $-\sqrt{U_i^2 + U_j^2} < r < \sqrt{U_i^2 + U_j^2}$.

Der Parameterraum ist damit gegeben durch

$$\Omega = \left\{ (\omega, r) \;\mid\; \omega \in \left[-\frac{\pi}{2}, \ldots, \frac{\pi}{2}\right[\;\wedge\; r \in \left]-\sqrt{U_i^2 + U_j^2}, \ldots, \sqrt{U_i^2 + U_j^2}\;\right[\right\} \tag{4.5}$$

und enthält alle in t darstellbaren Geraden. Um eine Verarbeitung mit dem Computer zu ermöglichen wird Ω, wie auch schon der Bildraum X, diskretisiert.

Auf Grundlage dieser Festlegungen läßt sich die Hough-Transformierte H einer Geraden definieren, die aus den diskreten Punkten $H^{\omega,r} \in \mathbb{N}$, $(\omega, r) \in [0,\ldots,N_\Omega - 1] \times [0,\ldots,N_r - 1]$ bestehen. Es gelte

$$H^{\omega,r} = \left|\; \{(i,j) \mid (i,j) \in X \;\wedge\; g(\omega, r, i, j) = 0\} \;\right| . \tag{4.6}$$

Um den aus dieser Definition der Hough-Transformation abgeleiteten Algorithmus zur Geradendetektion besser verdeutlichen zu können, wird ein Beispiel herangezogen:

Sei g eine Gerade, die im Bildraum aus den Bildpunkten $G \subseteq X$ gebildet wird. Dann berechnet der Algorithmus zur Geradendetektion an jedem Punkt $(i,j) \in G$ für alle $\omega \in \left[-\frac{\pi}{2}, \dots, \frac{\pi}{2}\right[$ ein r, so daß $g(i,j,\omega,r) = 0$ gilt. Damit ergibt sich für jeden Punkt (i,j) der Geraden im Bildraum ein Kurvenzug im Parameterraum. Dieser Kurvenzug beschreibt alle möglichen Geraden, die im Bildraum durch (i,j) verlaufen können. Die Bildpunkte in G stellen im Bildraum eine Gerade dar, die sich durch einen festgelegten Steigungswinkel ω_g und einen Abstand zum Ursprung r_g auszeichnet. Diese Gerade ist die einzige, die im Bildraum durch alle Bildpunkte in G verläuft. Damit schneiden sich alle Kurven im Parameterraum, die durch die Geradenpunkte $(i,j) \in G$ erzeugt werden, in genau einem Punkt. Dieser gibt den Steigungswinkel ω_g der Geraden g und deren Entfernung r_g zum Ursprung U an.

Dieser Idealfall tritt allerdings i.A. nicht auf, durch die Diskretisierung und optische Effekte bei der Bildaufnahme (z.B. Linsenverzerrung) stellt sich der Schnittpunkt durch ein gestreutes lokales Maximum in der Umgebung der genauen Werte für die Geradenparameter dar.

Die hier implementierte Hough-Transformation wird nach einer Anregung von J.Pauli [34] noch verbessert und beschleunigt, indem als zusätzliche Information die vom Canny-Algorithmus generierten Gradientenwinkel der Kanten im Bildraum herangezogen wird. Es wird angenommen, daß eine mögliche Gerade, die durch eine Kontur im Bildraum gebildet wird, in etwa senkrecht zu der Gradientenrichtung der Kontur verläuft, die diese Gerade bildet. Mit Hilfe dieses a-priori Wissens über den Geradenverlauf läßt sich die Transformation optimieren.

Sei $(i,j) \in G$ ein Punkt einer Geraden im Bildraum und $\Theta^{i,j}_{\nabla f}$ der vom Canny-Algorithmus erzeugte Gradientenwinkel in diesem Punkt. Dann wird für (i,j) nicht mehr die vollständige Transformationskurve in Ω eingetragen, sondern nur der Abschnitt der Kurve, für den gilt

$$g(\omega,r,i,j) = 0 \ \wedge \ (\Theta^{i,j}_{\nabla f} - \epsilon) < \omega < (\Theta^{i,j}_{\nabla f} + \epsilon) \tag{4.7}$$

Damit wird die Hough-Transformierte H reduziert auf

$$\hat{H}^{\omega,r} = |\ \{(i,j) \mid (i,j) \in G \ \wedge \ g(\omega,r,i,j) = 0 \ \wedge \ (\Theta^{i,j}_{\nabla f} - \epsilon) < \omega < (\Theta^{i,j}_{\nabla f} + \epsilon)\ \}\ |. \tag{4.8}$$

Der Winkel ϵ ist dabei der maximale Fehler, den $\Theta^{i,j}_{\nabla f}$ aufweist.

Durch diese Einschränkung wird das Verfahren wesentlich beschleunigt, und die Fehleranfälligkeit der folgenden Maximumsuche wird verringert.

Ein auf diese Weise aus Abbildung 4.2 entstandenes Hough-Bild ist in Abbildung 4.3 dargestellt. Man erkennt in dieser Abbildung deutlich die lokalen Maxima der die Farbfelder bzw. das Farbtableau begrenzenden Geraden, die in zwei Reihen bei etwa $\omega = 10°$ und $\omega = 95°$ angeordnet sind.

Aus dem Parameterraum kann man nun recht einfach Informationen über im Bildraum vorhandene Geraden erhalten, indem man die lokalen Maxima des Hough-Bildes detektiert. Jedes lokale Maximum wird durch ein Parameterpaar (ω, r) beschrieben, das im Bildraum eine Gerade beschreibt. Da anhand der Vorverarbeitung durch den

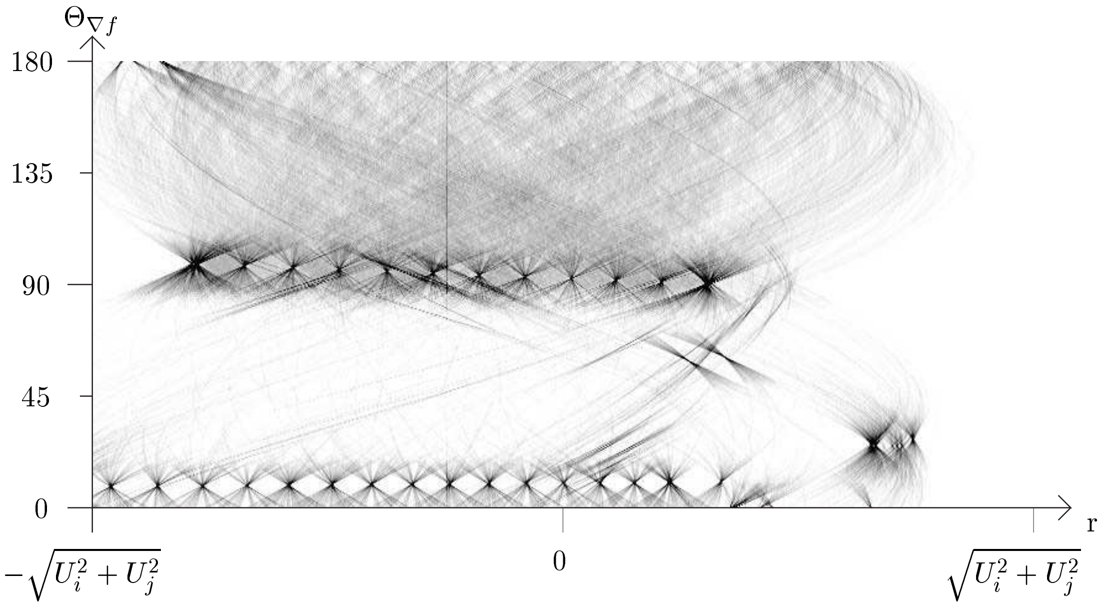

Abbildung 4.3.: Die Hough-Transformierte des vorverarbeiteten Kamerabildes aus Abbildung 4.2.

Canny-Algorithmus im Bildraum ausschließlich Punkte gesetzt sind, an denen starke Gradienten existieren, kann man davon ausgehen, daß entlang einer durch die Parameter (ω, r) eines lokalen Maximums gegebenen Geraden eine Kante im Originalbild liegt.

Der für die vorliegende Arbeit verwendete Algorithmus zur Detektion lokaler Maxima ist recht einfach. Es wird nacheinander eine festgelegte Zahl N_{max} von globalen Maxima gesucht, wobei nach dem Finden des Maximums dieses selbst und der Bereich um das Maximum gelöscht werden, so daß kein verrauschtes Maximum eine weitere Gerade nahe der gesuchten erzeugen kann. Durch großzügiges Löschen in Richtung des Parameters r kann vermieden werden, daß zwei Kanten gefunden werden, die zu eng beieinander liegen, um Begrenzungen von benachbarten Farbfeldern zu sein.

N_{max} wird in dieser Arbeit durch die Anzahl der im Farbtableau zu findenden Kanten auf 28 gesetzt.

4.1.3. Rekonstruktion der zur Extraktion des Farbtableaus relevanten Geraden

Als Ergebnis dieser beiden Verfahren erhält man eine Geradenschar $g_i(\omega_{g_i}, r_{g_i})$ mit $i \in [1, \ldots, N_{max}]$. Abbildung 4.4 (oben links) zeigt die aus Abbildung 4.3 generierte Geradenschar, die in das Originalbild eingezeichnet ist.

Auf diese durch die Maximumsuche erzeugte Geradenschar wird folgende Heuristik angewandt, welche die relevanten Geraden extrahiert und möglicherweise fehlende Geraden interpoliert. Diese Heuristik soll hier kurz umrissen werden.

Aus der Konstruktion der Geradenschar folgt, daß die Geraden entlang der im Bild am deutlichsten ausgeprägten geraden Kanten verlaufen. Man kann annehmen, daß ein großer Teil dieser Kanten die einzelnen Farbfelder des Farbtableaus bzw. das Tableau selbst begrenzen. Die Geraden verlaufen daher in zwei Hauptorientierungen, die in etwa im rechten Winkel zueinander liegen müssen. Diese Hauptorientierungen sind ebenfalls sehr gut in Abbildung 4.3 zu erkennen, sie liegen in diesem Beispiel bei Winkeln von etwa 10° und 95°. Es werden also zunächst zwei Winkel ϕ und $\phi + \frac{\pi}{2}$ gesucht in deren Umgebung möglichst viele Richtungswinkel ω_i der Geraden aus der Geradenschar liegen. Sei also

$$M(\phi) = \{\, g_i \mid (\phi - \epsilon < \omega_{g_i} < \phi + \epsilon) \;\vee\; (\phi + \frac{\pi}{2} - \epsilon < \omega_{g_i} < \phi + \frac{\pi}{2} + \epsilon) \,\}\,, \tag{4.9}$$

dann wird $\phi \in [0, \ldots, \frac{\pi}{2}[$ so gewählt, daß $|M(\phi)|$ maximal ist. Die Geraden, die in dieser Menge $M(\phi)$ liegen, werden aus der Schar ausgewählt, alle anderen werden für die weitere Berechnung vernachlässigt. Die auf diese Weise ausgewählten Geraden sind in Abbildung 4.4 im oberen rechten Bild eingetragen.

Es wird versucht, aus den bisher generierten möglichen Farbfeldkanten die ungefähre Farbfeldgröße und die Begrenzung des Tableaus zu ermitteln, indem der mittlere Geradenabstand und Informationen über Farbwerte, die in den Feldern vorherrschen müssen, herangezogen werden. Fehlende Geraden können mit Hilfe dieser Informationen zwischen den bestehenden interpoliert werden, und noch vorhandene Geraden,

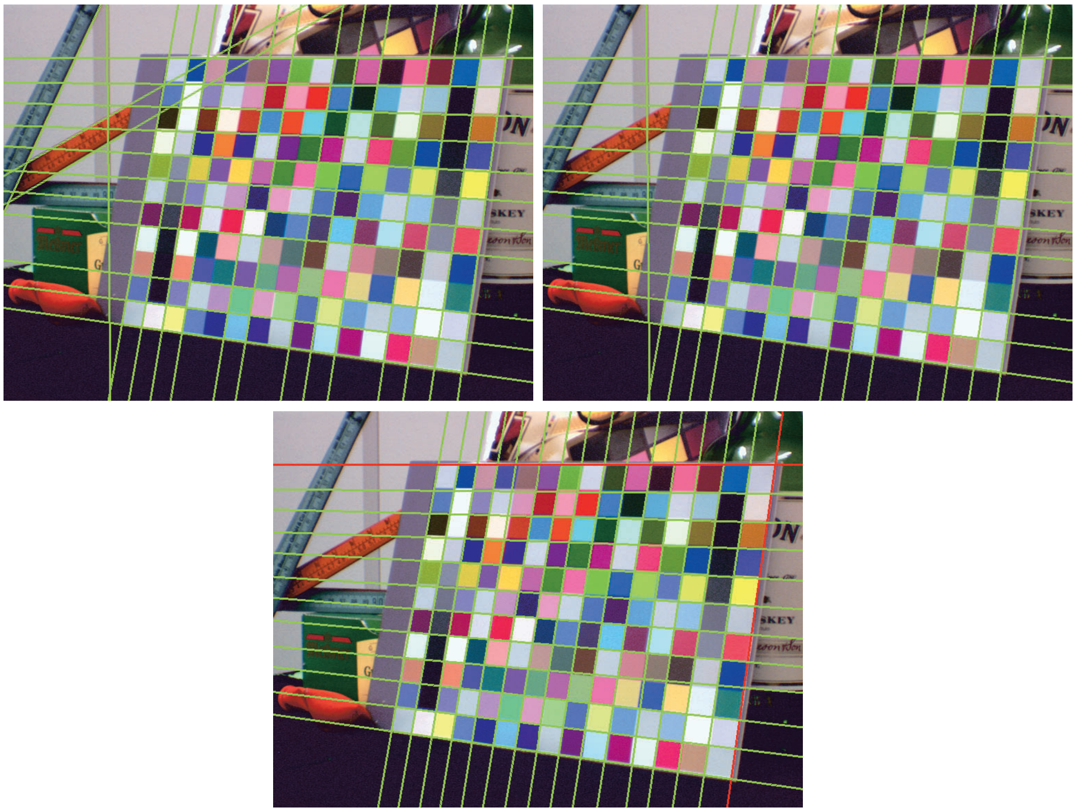

Abbildung 4.4.: Die mittels der Hough-Transformation erzeugten Geraden werden in zwei Schritten reduziert und interpoliert, um die gesuchten Farbfeldbegrenzungen zu ermitteln.

die keine Farbfeldbegrenzungen darstellen, können aussortiert werden. Das Ergebnis dieses Schrittes ist in Abbildung 4.4 (unten) zu sehen. Nach der Extraktion und Interpolation der Geraden wird anhand der Farben einzelner Felder die Orientierung des Tableaus ermittelt, so daß das vorgestellte Verfahren unabhängig von der Rotation der Farbtafel im Kamerabild funktioniert.

An dieser Stelle sollten alle farbfeldbegrenzenden Geraden gefunden und die Orientierung des Farbtableaus bekannt sein.

4.1.4. Berechnung des mittleren Farbwertes eines Farbfeldes

Die Auswertung der so lokalisierten Farbfelder ist eine einfache Mittelwertbildung der zu den Farbfeldern gehörenden Pixel. Die Position dieser Pixel wird aus den farbfeldbegrenzenden Geraden ermittelt, wobei nur Bildpunkte berücksichtigt werden, die einen festgelegten Abstand zu den Geraden einhalten. Damit wird der Ungenauigkeit der Hough-Geraden Rechnung getragen, so daß bei der Mittelwertbildung nur die zum ausgewerteten Farbfeld gehörenden Pixel berücksichtigt werden. Die mittlere Farbe eines Farbfeldes F wird folgendermaßen berechnet:

Seien $g_a(\omega_{g_a}, r_{g_a})$, $g_b(\omega_{g_b}, r_{g_b})$, $g_c(\omega_{g_c}, r_{g_c})$, $g_d(\omega_{g_d}, r_{g_d})$ die vier das Farbfeld F umschließenden Geraden. Dann werden zunächst die Schnittpunkte der Geraden bestimmt. So ergibt sich z.B. der Schnittpunkt (x_{ab}, y_{ab}) der Geraden g_a und g_b im Bildraum durch

$$\begin{aligned} y_{ab} &= \frac{r_{g_b}\cos\omega_{g_a} - r_{g_a}\cos\omega_{g_b}}{\cos\omega_{g_a}\sin\omega_{g_b} - \sin\omega_{g_a}\cos\omega_{g_b}} \qquad \text{und} \\ x_{ab} &= \frac{r_{g_a} - y_{ab}\sin\omega_{g_a}}{\cos\omega_{g_a}} \end{aligned} \tag{4.10}$$

Ebenso werden die anderen Geradenschnittpunkte (x_{bc}, y_{bc}), (x_{cd}, y_{cd}) und (x_{da}, y_{da}) berechnet. Diese vier Punkte sind die Eckpunkte des Vierecks im Bildraum, welches das Farbfeld F umschließt. Mit der Kenntnis dieser Punkte läßt sich nun leicht die mittlere Farbe für jeden Farbkanal F^R, F^G und F^B von F für jeden Farbkanal berechnen, so gilt z.B. für F^c mit $c \in \{R, G, B\}$

$$\begin{aligned} F^c &= \frac{1}{|M|}\sum_{(x,y)\in M} f^{x,y} \quad \text{mit} \\ M &= \{\,(x,y) \mid (x > x_{ab}+k) \;\wedge\; (x > x_{bc}+k) \;\wedge\; (x < x_{cd}-k) \;\wedge \\ &\qquad (x < x_{da}-k) \;\wedge\; (y > y_{ab}+k) \;\wedge\; (y < y_{bc}-k) \;\wedge \\ &\qquad (y < y_{cd}-k) \;\wedge\; (y > y_{da}+k)\,\}\,,\; k \in \mathbb{N}_0\,. \end{aligned} \tag{4.11}$$

Hierbei ist f, wie schon in Abschnitt 4.1.1, ein Farbkanal des Original-Kamerabildes, in diesem Fall bestimmt die Wahl von f, von welchem Farbkanal der Mittelwert berechnet wird. Die Konstante k ist ein Sicherheitsabstand, der der Ungenauigkeit der Hough-Geraden Rechnung trägt. Der Abstand k ist in dieser Arbeit auf acht Pixel zu jedem Rand des Farbfeldes gesetzt.

Abbildung 4.5.: Die vollständig extrahierte Farbtafel aus Abbildung 4.1.

Eine vollständig extrahierte Farbtafel ist in Abbildung 4.5 zu sehen. Die zur Mittelwertbildung der Farbfelder verwandten Pixelbereiche sind dunkler dargestellt, dadurch ist der Sicherheitsabstand k gut zu erkennen.

Die Mittelwerte, die sich aus dieser Berechnung für die Farbfelder ergeben, entsprechen den von der Kamera wahrgenommenen mittleren RGB-Antworten für die Felder des Farbtableaus. Da für die Farbfelder die spektralphotometrisch gemessenen L*a*b*-Werte ebenfalls bekannt sind, können diese als Stützwerte zur Kameraprofilberechnung herangezogen werden.

4.1.5. Ergebnisse des Verfahrens zur Extraktion einer Farbtafel

Das beschriebene Verfahren extrahiert das Tableau sehr robust. Es ist invariant gegenüber perspektivischen Verzerrungen und Drehungen des Tableaus, und findet die Farbtafel, wenn sie mehr als 25 Prozent des Bildes ausfüllt.

Eine einfache Möglichkeit, das Verfahren zu verbessern, wäre sicherlich, einen auf Farbbilder angepaßten Canny-Operator anzuwenden, wie z.B. den bereits in Abschnitt 4.1.1 erwähnten erweiterten Algorithmus von Kansade. Die hier beschriebenen Canny- und Hough-Operatoren werden nur auf dem Grauwertbild eines RGB-Kanals angewandt. Es wird aber schon auf jedem einzelnen Kanal mit dem beschriebenen Verfahren eine sehr robuste Extraktion erreicht, so daß eine mögliche Verbesserung der Verfahrensrobustheit durch den gesteigerten Aufwand an Rechenzeit nicht vertretbar erscheint.

Die Zeit zur Extraktion des Tableaus läßt sich für das in Abschnitt 2.4 vorgestellten Computersystem mit etwa 1.54 s angeben. Davon benötigen der Canny-Operator 596 ms, die Hough-Transformation 710 ms und die Geradenrekonstruktion 233 ms.

4.2. Ausgleich der Beleuchtungsverhältnisse

Anders als beim Scanner existiert bei der Videokamerakalibrierung das Problem der ungleichmäßigen Ausleuchtung des Farbtableaus. Daher sind auf dem Tableau zur Kalibrierung einer Farbvideokamera graue Farbfelder gleichmäßig verteilt, die bei der spektralphotometrischen Messung einheitliche Helligkeitswerte aufweisen. Mit diesen Graufeldern wird jetzt eine mittlere Beleuchtung für das Tableau berechnet und auf dieser Basis die ungleichmäßige Ausleuchtung des Tableaus ausgeglichen.

Mittels der von der Kamera gemessenen Farbwerte für die Graufelder kann man auf die unterschiedliche Ausleuchtung der verschiedenen Regionen des Farbtableaus schließen. Dazu wird zunächst die mittlere RGB-Antwort der Videokamera für diese Felder berechnet. Dieser Wert wird im folgenden als mittlerer Grauwert bezeichnet. Daraufhin können die Abweichungen der einzelnen Graufelder vom mittleren Grauwert berechnet werden. Aus diesen Abweichungen werden die Beleuchtungsbedingungen interpoliert, die in den Farbfeldern vorherrschen, die zwischen den Graufeldern angeordnet sind. Im einzelnen ist der folgende Algorithmus implementiert:

Sei F die Menge aller Farbfelder des Tableaus, bezeichnet durch $F_i,\ i \in [1, \ldots, N_F]$. Hierbei sei N_F die Anzahl der Farbfelder des Tableaus. Für die in Abschnitt 3.2 vorgestellte Farbtafel gilt also $N_F = 165$. Zudem sei F_i der Ortsvektor des i-ten Farbfeldes im Kamera-RGB-Raum, es gelte $F_i = (F_i^R,\ F_i^G,\ F_i^B)^T$. Weiterhin seien $F_i^c,\ c \in \{R, G, B\}$ die in Abschnitt 4.1 ermittelten Kamera-RGB-Werte aller Farbfelder des Farbtableaus.

Jedes Farbfeld F_i hat zudem eine Position $P_i = (x_i, y_i),\ x_i \in [1, \ldots, N_x],\ y_i \in [1, \ldots, N_y]$ auf der Farbtafel. Hierbei seien wiederum N_x und N_y die Anzahl der Farbfelder auf dem Tableau in x- und y-Richtung.

Seien $G_i \in G \subseteq F,\ i \in [1, \ldots, N_G]$ die Kamera-RGB-Werte der über das Farbtableau verteilten Graufelder. N_G sei dabei deren Anzahl, für das verwendete Tableau gilt $N_G = 19$.

Aus diesen G_i wird ein mittlerer Grauwert $\overline{G} = (\overline{G}^R,\ \overline{G}^G,\ \overline{G}^B)^T$ über alle Graufelder bestimmt, mit

$$\overline{G}^R = \frac{1}{N_G} \sum_{i=1}^{N_G} G_i^R, \quad \overline{G}^G = \frac{1}{N_G} \sum_{i=1}^{N_G} G_i^G, \quad \overline{G}^B = \frac{1}{N_G} \sum_{i=1}^{N_G} G_i^B\ . \tag{4.12}$$

Anschließend wird nach der Euklidischen Metrik die Entfernung $E_{i,k},\ i \in [1, \ldots, N_F]$, $k \in [1, \ldots, N_G]$ für jedes Farbfeld F_i zu allen Graufeldern G_k bestimmt. Da jedes Graufeld G_k einem Farbfeld F_j entspricht, existiert also ein $F_j = G_k$. Damit gelte

$$E_{ik} = \mid F_i - F_j(= G_k) \mid = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}\ . \tag{4.13}$$

Hiernach wird jedes Farbfeld F_i entsprechend seiner Ausleuchtung korrigiert. Dazu wird das nach dem Abstand gewichtete Mittel der umliegenden Graufelder G_k gebildet und damit separat für jeden Farbkanal ein theoretischer Grauwert $\tilde{G}_i = (\tilde{G}_i^R,\ \tilde{G}_i^G,\ \tilde{G}_i^B)^T$ an der Position des Farbfeldes F_i wie folgt berechnet.

Es gelte

$$\forall_{c\in\{R,G,B\},\, i\in[1,\ldots,N_F]} \quad \tilde{G}_i^c = \frac{1}{\sum_{k=1}^{N_G} f(E_{ik})} \sum_{k=1}^{N_G} f(E_{ik}) * G_k^c \,. \tag{4.14}$$

Für f kann eine beliebige Gewichtsfunktion eingesetzt werden, die mit wachsender Entfernung abnimmt, ein gutes Ergebnis liefert die Gaußfunktion

$$f(d) = \exp\left(-\frac{d^2}{\sigma^2}\right) \,. \tag{4.15}$$

Ein so berechneter Wert $\tilde{G}_i$ beschreibt den Farbwert an der Position i, wenn an dieser Stelle ein Graufeld mit der Farbe der Graufelder G_i vorhanden wäre. Mit diesen $\tilde{G}_i$ kann das entsprechende Farbfeld F_i korrigiert werden. Dazu wird der Korrekturvektor $\Delta_i = (\Delta_i^R,\ \Delta_i^G,\ \Delta_i^B)^T$ gebildet durch

$$\forall_{c\in\{R,G,B\},\, i\in[1,\ldots,N_F]} \quad \Delta_i^c = \frac{1 + \overline{G}^c - \tilde{G}_i^c}{\overline{G}^c} \,. \tag{4.16}$$

Die Farbkorrektur wird durch elementweise Multiplikation des Korrekturvektors Δ_i mit dem Farbwert F_i erreicht. Diese Multiplikation zur Farbkorrektur leitet sich aus dem Sensormodell für die Farbwahrnehmung aus Abschnitt 2.2 her.
Es gilt somit für den korrigierten Farbwert $\tilde{F}_i$,

$$\tilde{F}_i = \begin{pmatrix} \Delta_i^R * F_i^R \\ \Delta_i^G * F_i^G \\ \Delta_i^B * F_i^B \end{pmatrix} \,. \tag{4.17}$$

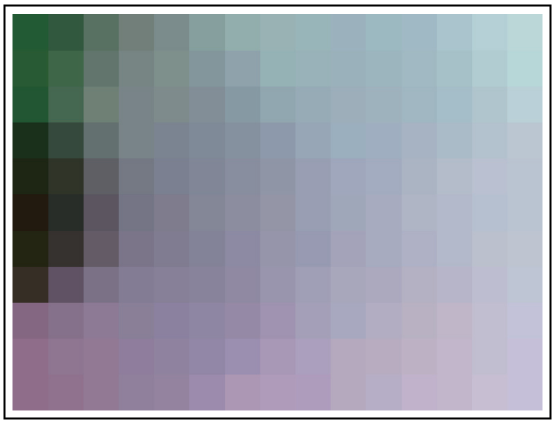

Abbildung 4.6.: Schematische Darstellung des Beleuchtungsausgleiches mit einer Verstärkung um den Faktor 4 bei einer Anwendung auf Graufelder.

Der Farbwert $\tilde{F}_i$ stellt die an der Position i aufgenommene Farbe unter einer über das gesamte Farbtableau gleichen Umgebungsbeleuchtung dar, die dem Mittel der tatsächlichen Tableaubeleuchtung entspricht.

In Abbildung 4.6 ist der Beleuchtungsausgleich über die gesamte Farbtafel aus Abbildung 4.5 schematisch dargestellt. Die Farbkorrektur aus Gleichung 4.17 wird in diesem Bild nicht auf die gemessenen Farbwerte der Tableaufelder angewandt, sondern auf einen mittleren Grauwert mit dem RGB-Farbvektor $(128, 128, 128)$, dabei wird eine Verstärkung des Beleuchtungsausgleiches mit dem Faktor 4 vorgenommen, um den Effekt besser sichtbar zu machen. In den Bereichen, die einen mittleren Grauwert darstellen, ist somit kein Beleuchtungsausgleich vorgenommen. Mit dem Beleuchtungsausgleich ist der Ausgangspunkt für die Erstellung eines Kameraprofils erreicht. Die dafür verwendete Algorithmik schließt sich im folgenden Kapitel an.

5. Die Berechnung des initialen Kameraprofils

Als Ergebnis aus Kapitel 4 stehen verläßliche Mittelwerte der Videokameraantworten für die Felder des Farbtableaus zur Verfügung. Die spektralphotometrischen Meßwerte der Feldfarben unter Normlichtbedingungen sind ebenfalls bekannt. Somit können diese Wertepaare als Stützstellen der Transformation von Kamera-RGB-Farbwerten in geräteunabhängige L*a*b*-Farbwerte verwendet werden. Anhand dieser Stützstellen wird im vorliegenden Kapitel die Approximation des Kameraprofils durchgeführt.

Die Güte dieser Approximation ist essentiell für die Güte der Kalibrierung, daher ist dieser Teil der Arbeit besonders ausführlich und in vielen Variationen untersucht worden. Die Schwierigkeit der Approximation besteht darin, ein möglichst glattes Profil zu erzeugen, das sich trotzdem so gut wie möglich an den gegebenen Stützstellen orientiert. Glatt heißt hierbei, daß das Profil eine stetige Funktion repräsentiert, deren erste Ableitung möglichst gering ist. Eine zu hohe erste Ableitung erzeugt Farbabrisse. Das bedeutet, zwei im Kamera-RGB-Raum benachbarte Farben werden auf so unterschiedliche Farben im CIE-L*a*b*-Raum abgebildet, daß zwischen ihnen eine Farbkante in einem an sich kontinuierlichen Farbverlauf sichtbar wird. Dies ist für Reproduktionszwecke ungeeignet und muß nach Möglichkeit vermieden werden, auch wenn eine möglichst genaue Approximation der Stützstellen dies erfordern sollte.

Die Erzeugung eines guten Profils ist bei der Kamerakalibrierung schwieriger als bei der Scannerkalibrierung, da durch die Konzeption des Farbtableaus weniger Stützstellen zur Verfügung stehen. Zudem variieren die Funktionswerte an den Stützstellen durch ungleichmäßige Ausleuchtung und variable Umwelteinflüsse erheblich stärker sind als beim Scanner.

So wurden für diese Kalibrierung zahlreiche algorithmische Varianten implementiert, von denen die in Abschnitt 5.2 erläuterte Implementation die besten Ergebnisse liefert. In Abschnitt 5.4 sollen noch kurz zwei der zusätzlich untersuchten Varianten einer Profilinterpolation beschrieben werden, die allerdings verworfen wurden, da sie im Test schlechtere Ergebnisse liefern.

5.1. Das initiale Kameraprofil

Unter dem Begriff initiales Kameraprofil soll im folgenden das Kameraprofil verstanden werden, welches im ersten Teil des Kalibrierverfahrens mit der Farbtafel erzeugt wird und die Farbkorrektur für die Beleuchtungssituation zum Zeitpunkt dieser initialen Kalibrierung realisiert. Bei späteren Beleuchtungsänderungen wird dann das initiale Kameraprofil an die neuen Lichtverhältnisse angepaßt.

Dieses initiale Kameraprofil besteht ausschließlich aus einer dreidimensionalen Wertetabelle, die eine nichtlineare Funktion $CAL : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ diskretisiert und damit eine schnelle Berechnung dieser Funktion realisiert. Die Funktion CAL berechnet für jeden Kamera-RGB-Farbwert den entsprechenden geräteunabhängigen und beleuchtungsinvarianten L*a*b*-Farbwert. Sie wird mittels der im vorigen Kapitel erzeugten Stützstellen approximiert.

Da die Kamera für jeden der drei Farbkanäle R, G und B einen 8-Bit-Wert erzeugt, müßte eine diskrete Wertetabelle, die für jede mögliche Kameraeingabe den korrekten RGB-Wert liefert, insgesamt $2^8 \cdot 2^8 \cdot 2^8$ dreidimensionale Funktionswerte speichern. Jeder Funktionswert benötigt bei einer entsprechenden Diskretisierung auf ebenfalls 8 Bit Speicherplatz von 3 Byte, damit hätte die Wertetabelle eine Größe von 48 MB. Eine Tabelle dieser Größe ist für einem Rechner mit 256 MB Hauptspeicher durchaus realistisch, und auch die das Ermitteln von Funktionswerten aus dieser Tabelle arbeitet in ausreichender Geschwindigkeit, um eine Echtzeitanwendung mit einer Videokamera zu realisieren. Das Problem besteht in der Erstellung einer Tabelle dieser Größe. Diese benötigt mit dem im folgenden erläuterten Approximationsalgorithmus eine Zeit von bis zu drei Stunden. Zudem wäre bei einer Tabelle dieser Größe eine Profilanpassung an variierende Beleuchtungsbedingungen in Videoechtzeit kaum möglich.

Aus diesem Grund wird eine Wertetabelle erstellt, die ausschließlich die fünf höherwertigen Bits jedes Kamerakanals berücksichtigt. Damit verringert sich die Größe der Tabelle auf $2^5 \cdot 2^5 \cdot 2^5$ Funktionswerte und der Speicherplatzbedarf auf 96 kB. Die Erstellung dieser kleineren Tabelle benötigt nur etwa 10 bis 15 Sekunden.

Diese stärkere Diskretisierung der Eingabewerte bedeutet natürlich eine visuelle Verschlechterung des Kamerabildes. Daher wird eine dreidimensionale Interpolation auf Basis der drei niederwertigen Bits jedes Farbkanals vorgenommen, um diese stärkere Diskretisierung auszugleichen und geeignete Zwischenwerte zwischen den Diskretisierungsstufen zu finden. Diese Interpolation wird jedoch nicht verwendet, um aus der 96 kB großen Wertetabelle wiederum eine interpolierte Tabelle mit 256^3 Einträgen und einer Größe von 48 MB zu erstellen. Dies würde zwar nicht den Zeitrahmen der Profilgenerierung sprengen, da die in Abschnitt 5.3 erläuterte *Tetraederinterpolation* ein sehr effizientes Interpolationsverfahren ist. Es wäre allerdings immer noch unmöglich, die automatische Anpassung eines derart großen Kameraprofils in Videoechtzeit zu erreichen. Die Tetraederinterpolation wird daher nach der Kalibrierung eines jeden Kamerabildes auf die Funktionswerte des Bildes angewandt.

5.2. Die Berechnung der diskreten Wertetabelle des initialen Kameraprofils

Zur Approximation der Funktion CAL aus den mittels der Farbtafel generierten Stützstellen ist ein Algorithmus implementiert worden, der CAL iterativ berechnet. Dieser Algorithmus erzeugt zunächst mit einem Minimierungsverfahren eine Funktion CAL_1 als erste Näherung und paßt diese dann iterativ an die vorgegebenen Stützstellen an.

5.2.1. Erzeugen einer ersten Näherung für das initiale Kameraprofil

Die erste Näherung CAL_1 der Funktion CAL wird zunächst durch eine lineare Transformation der Kamera-RGB-Werte in den CIE-XYZ-Raum realisiert, die als 3×3 - Matrix A gegeben ist. Das Ziel des vorliegenden Abschnittes ist es, unter Verwendung der vorhandenen Stützstellen geeignete Koeffizienten für diese Matrix zu berechnen. Vom CIE-XYZ-Raum ist eine Umrechnung der Funktionswerte in den CIE-L*a*b*-Raum gemäß den von der CIE festgelegten Gleichungen aus Abschnitt 2.3.3 möglich.

Mit der Notation aus Abschnitt 4.2 seien also die Wertepaare $F_i \leftrightarrow CAL(F_i)$ mit $F_i = (F_i^R,\ F_i^G,\ F_i^B)^T$ und $CAL(F_i) = (CAL^L(F_i),\ CAL^a(F_i),\ CAL^b(F_i))^T$ die in Kapitel 4 generierten Stützstellen.

In diesem Abschnitt wird desweiteren die Notation $CAL^{XYZ}(F_i) = (CAL^X(F_i),$ $CAL^Y(F_i),\ CAL^Z(F_i))^T$ verwendet. Diese Notation soll den Funktionswerten im Zwischenschritt der Berechnung von CAL nach der linearen Transformation in den CIE-XYZ-Raum entsprechen. Auch hier ist CAL_1^{XYZ} die Erste Näherung der Funktion. Weiterhin gilt $CAL(F_i) = f(CAL^{XYZ}(F_i))$, f sind in diesem Fall die Umrechnungsgleichungen der CIE.

Um eine gute Näherung der Funktion CAL^{XYZ} durch eine lineare Transformation zu ermitteln, wird eine quadratische Optimierung durchgeführt, die gewährleistet, daß die Summe der quadratischen Fehler über alle gegebenen Stützwerte minimal wird. Die zum Beleuchtungsausgleich verwendeten Graufelder sind dabei ausgenommen, um eine zu starke Überrepräsentation im Bereich der mittleren Grautöne auszuschließen. Diese Minimierungsaufgabe liefert als Ergebnis die optimale lineare Transformation für CAL^{XYZ} unter Berücksichtigung aller Stützstellen.

Damit überhaupt eine lineare Transformation aus dem Kamera-RGB- in den CIE-XYZ-Raum möglich ist, müßte die RGB-Antwort theoretisch vorentzerrt werden. Die Intensitätsrezeption der Videokamera ist i.A. nichtlinear zur tatsächlichen Intensitätsverteilung, die vom Spektralphotometer gemessen wird. Diese Nichtlinearität sollte festgestellt und ausgeglichen werden, da sonst die Existenz einer angenähert linearen Transformation der Kamera-RGB-Daten in den XYZ-Raum nicht gewährleistet ist. Da allerdings die Kameraantwort der verwendeten Sony-Videokamera in weiten Bereichen Werte aufweist, die zu denen des Spektralphotometers linear sind, ist es möglich, auch ohne vorhergehende Vorentzerrung eine gute und sogar bessere erste Näherung für eine Umrechnung von Kamera-RGB-Daten in den CIE-XYZ-Raum zu erzielen. In Abschnitt 5.4.1 wird noch weiter auf die Vorentzerrung eingegangen und erläutert, warum diese in dem hier dargestellten Kalibrieralgorithmus nicht zur Anwendung kommt.

Die lineare Transformation aus dem Kamera-RGB- in den CIE-XYZ-Raum läßt sich schreiben als

$$A\ F_i = CAL_1^{XYZ}(F_i)\,, \quad \text{mit} \quad A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix},$$

$$\text{und f.a. } i \in [1, \ldots, N_F]: \quad F_i = \begin{pmatrix} F_i^R \\ F_i^G \\ F_i^B \end{pmatrix},\ CAL_1^{XYZ}(F_i) = \begin{pmatrix} CAL_1^X(F_i) \\ CAL_1^Y(F_i) \\ CAL_1^Z(F_i) \end{pmatrix}.$$

Zu ermitteln sind die Koeffizienten der Matrix A. Dazu ist folgende Minimierungsaufgabe zu lösen:

$$\text{Finde eine Matrix } A, \text{ so daß } \sum_{i=1}^{N_F} \|CAL^{XYZ}(F_i) - A\ F_i\| \rightarrow \min \tag{5.1}$$

Die Minimierungsaufgabe kann in drei Teile aufgespalten werden. Für jede der drei Matrixzeilen wird ein separates lineares Gleichungssystem erstellt, dessen Lösung die Koeffizienten der entsprechenden Matrixzeile darstellt. Es sind die drei folgenden Gleichungssysteme zu lösen:

$$\begin{aligned}
\begin{pmatrix} F_1^R & F_1^G & F_1^B \\ F_2^R & F_2^G & F_2^B \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{N_F}^R & F_{N_F}^G & F_{N_F}^B \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} CAL^X(F_1) \\ CAL^X(F_2) \\ \vdots \\ CAL^X(F_{N_F}) \end{pmatrix} \quad \text{und} \\
\begin{pmatrix} F_1^R & F_1^G & F_1^B \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{N_F}^R & F_{N_F}^G & F_{N_F}^B \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} a_{21} \\ a_{22} \\ a_{23} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} CAL^Y(F_1) \\ \vdots \\ CAL^Y(F_{N_F}) \end{pmatrix} \quad \text{und} \\
\begin{pmatrix} F_1^R & F_1^G & F_1^B \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ F_{N_F}^R & F_{N_F}^G & F_{N_F}^B \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} a_{31} \\ a_{32} \\ a_{33} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} CAL^Z(F_1) \\ \vdots \\ CAL^Z(F_{N_F}) \end{pmatrix} .
\end{aligned} \tag{5.2}$$

Für $N_F > 3$ sind die Gleichungssysteme überbestimmt und es ist i.A. nicht möglich, eine eindeutige Lösung für die Matrixkoeffizienten zu finden. Die zur Kamerakalibrierung verwendeten Farbtafel hat 165 Farbfelder von denen 19 Graufelder ausschließlich zum Beleuchtungsausgleich verwendet werden, daher gilt $N_F = 146$. Somit muß eine Minimierung des Fehlers für jedes dieser Gleichungssysteme erfolgen. Für diese Minimierung wird ein Lösungsverfahren für überbestimmte Gleichungssysteme auf Basis der Pseudoinversen einer Matrix durchgeführt.

Die Pseudoinverse A^+ einer beliebigen Matrix A ist definiert durch

$$A^+ = (A^T\ A)^{-1}\ A^T\ .$$

Mit Hilfe der Matrix A^+ läßt sich die Gesamtfehlerminimierung zur Lösung eines überbestimmten Gleichungssystems einfach und effizient durchführen. Es gilt die Äquivalenz

$$\text{Finde einen Vektor } \vec{a}, \text{ so daß } \|\vec{b} - A\vec{a}\| \rightarrow \min \quad \Longleftrightarrow \quad \vec{a} = A^+\vec{b}\ .$$

Mit dieser Methode lassen sich Approximationen für die drei oben aufgeführten Gleichungssysteme finden und damit die Matrixkoeffizienten der Matrix A berechnen, die die Minimierungsaufgabe aus Gleichung 5.1 löst.

Anschließend wird eine Normierung der Matrixzeilen vorgenommen, da für ein absolutes Weiß W mit $W^{RGB} = (255, 255, 255)^T$ auch immer $CAL_1^{XYZ}(W^{RGB}) = (1, 1, 1)$

gelten sollte. In der Praxis treten hier z.T. leichte Abweichungen auf. Durch die Normierung entsteht die Matrix $\tilde{A}$, mit $\tilde{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{255\,(a_{1j}+a_{2j}+a_{3j})}$ für jedes Element der Matrix.

Die Matrix $\tilde{A}$ realisiert nun die Umrechnung eines RGB-Kamerafarbvektors in einen Vektor im CIE-XYZ-Farbraum, es gilt für jeden Farbvektor $f = (f^R, f^G, f^B)^T$ aus dem RGB-Raum

$$\tilde{A}\, f = CAL_1^{XYZ}(f)\ . \tag{5.3}$$

Somit läßt sich mit der Matrix $\tilde{A}$ für jeden möglichen RGB-Kamerawert ein zugehöriger XYZ-Farbwert berechnen, den man wie folgt in den CIE-L*a*b*-Raum umrechnen kann (siehe Abschnitt 2.3.3):

Es gilt (falls $CAL_1^X(f), CAL_1^Y(f), CAL_1^Z(f) > 0.008856$)

$$\begin{aligned} CAL_1^L(f) &= 116\ \sqrt[3]{CAL_1^Y(f)} - 16, \\ CAL_1^a(f) &= 500\ \left(\sqrt[3]{CAL_1^X(f)} - \sqrt[3]{CAL_1^Y(f)}\right), \\ CAL_1^b(f) &= 200\ \left(\sqrt[3]{CAL_1^Y(f)} - \sqrt[3]{CAL_1^Z(f)}\right). \end{aligned} \tag{5.4}$$

Indem diese Berechnung iterativ für jeden in der diskreten Wertetabelle repräsentierten RGB-Wert durchgeführt wird, läßt sich die erste Näherung dieser Tabelle aufstellen.

5.2.2. Iterative Anpassung des Kameraprofils an die Stützstellen

Ausgehend von der in Abschnitt 5.2.1 berechneten ersten Näherung der Wertetabelle für das initiale Kameraprofil wird eine Iteration durchgeführt, die diese bereits generierte Näherung weiter an die bekannten Stützstellen annähert. Es ist sinnvoll, einen solchen iterativen Ansatz zu wählen. Ein Algorithmus, der zur Interpolation eines unbekannten L*a*b*-Funktionswertes eine Gewichtung der Stützstellen anhand ihres Abstandes im RGB-Raum berechnet, erzielt schlechtere Ergebnisse. Da die Funktion CAL nichtlinear ist, sagt der Abstand zweier RGB-Werte $|A - B|$ zueinander i.A. wenig über den Abstand $|CAL(A) - CAL(B)|$ ihrer Funktionswerte im CIE-L*a*b*-Raum aus. Die Interpolation sollte daher auf den nicht bekannten L*a*b*-Abständen durchgeführt werden.

Diese Behauptung hat sich gleichfalls experimentell bestätigt. Ein alternativer Algorithmus zur Berechnung der Wertetabelle, der die Interpolation anhand der Abstände im RGB-Raum durchführt, liefert visuell schlechtere Ergebnisse. Dieser Algorithmus ist in 5.4.2 kurz erläutert.

Der folgende Algorithmus basiert demgegenüber auf der Annahme, daß die erste Näherung der Wertetabelle gute Werte liefert. Der Algorithmus verschiebt die Funktionswerte der ersten Näherung CAL_1 in Richtung der als korrekt bekannten L*a*b*-Werte an den Stützstellen der Zielfunktion CAL. Dabei werden genau die L*a*b*-Werte von

CAL_1 und CAL einander weiter angenähert, die schon den geringsten Abstand zueinander aufweisen. Die Güte der ersten Näherung ist also essentiell für die Qualität des gesamten initialen Kameraprofils.

Um eine völlig korrekte Kalibrierung an allen Stützstellen zu erzielen, müßte gewährleistet sein, daß für jedes auf dem Farbtableau dargestellte Farbfeld die folgende Forderung gilt: Zu dem spektralphotometrisch gemessenen L*a*b*-Wert eines Farbfeldes muß von allen L*a*b*-Funktionswerten der ersten Näherung CAL_1 genau derjenige den geringsten Abstand haben, auf den die RGB-Kameraantwort für dieses Farbfeld abgebildet wird.

Diese Forderung wird durch die Funktion CAL_1 in guter Näherung erfüllt. Da sie i.A. nicht vollständig erreicht werden kann, wird für ein Farbfeld des Farbtableaus immer nur gelten $CAL_k(F_i) \xrightarrow{k\to\infty} CAL(F_i) + \Delta E_i$, wobei die Größe von ΔE_i ausschließlich von der Qualität der ersten Näherung CAL_1 abhängt. CAL_k ist in dieser Gleichung, wie auch im folgenden, die approximierte Funktion CAL_1 nach Anwendung von k Iterationen des Approximationsalgorithmus. Es wird die folgende Iteration auf der k-ten Näherung für jeden in der Wertetabelle repräsentierten Funktionswert durchgeführt:

Betrachtet wird zur Darstellung der Iteration der Übergang vom k-ten zum $(k+1)$-ten Durchlauf, also der Übergang $CAL_k \to CAL_{k+1}$. Sei desweiteren f ein beliebiger Farbwert aus dem RGB-Raum, für den ein Funktionswert $CAL_1(f)$ in der ersten Näherung existiert. Dabei ist f i.A. keine der mittels des Farbtableaus erzeugten Stützstellen F_i, sondern ein beliebiger zu interpolierender Farbwert.

Zunächst werden die Euklidischen Abstände d_{F_i} von $CAL_k(f)$ zu den L*a*b*-Farbwerten von allen Feldern F_i des Farbtableaus berechnet. Es gelte

$$\begin{aligned}\forall_i \quad d_{F_i}(f) &= ((CAL_k^L(f) - CAL^L(F_i))^2 + \\ &\quad (CAL_k^a(f) - CAL^a(F_i))^2 + \\ &\quad (CAL_k^b(f) - CAL^b(F_i))^2)^{\frac{1}{2}} \; .\end{aligned} \tag{5.5}$$

Anschließend wird eine Gewichtung dieser Abstände $d_{F_i}(f)$ mittels einer Gaußfunktion vorgenommen. Sei

$$\forall_i \quad w_{F_i}(f) = \exp\left(-\frac{d_{F_i}(f)^2}{\sigma^2}\right) \; . \tag{5.6}$$

Diese so entstandenen Gewichte w_{F_i} werden zur Mittelwertbildung verwendet. Es wird der mit den w_{F_i} gewichtete Mittelwert der Abweichungen gebildet, die die approximierte Funktion CAL_k von der Zielfunktion CAL an den Stellen der Farbfelder F_i des Kalibriertableaus aufweist. Der Mittelwert der Abweichungen beträgt

$$\begin{aligned}M_k^L(f) &= \frac{1}{\sum_i w_{F_i}(f)} \sum_i w_{F_i}(f) * (CAL^L(F_i) - CAL_k^L(F_i)) \; , \\ M_k^a(f) &= \frac{1}{\sum_i w_{F_i}(f)} \sum_i w_{F_i}(f) * (CAL^a(F_i) - CAL_k^a(F_i)) \; , \\ M_k^b(f) &= \frac{1}{\sum_i w_{F_i}(f)} \sum_i w_{F_i}(f) * (CAL^b(F_i) - CAL_k^b(F_i)) \; .\end{aligned} \tag{5.7}$$

Um diesen Mittelwert wird dann die Funktion CAL_k verändert, es gelte

$$\begin{aligned} CAL^L_{k+1}(f) &= CAL^L_k(f) + M^L_k(f)\ , \\ CAL^a_{k+1}(f) &= CAL^a_k(f) + M^a_k(f)\ , \\ CAL^b_{k+1}(f) &= CAL^b_k(f) + M^b_k(f)\ . \end{aligned} \tag{5.8}$$

Damit wird ein Funktionswert $CAL_k(f)$ um den Betrag der Fehler der ihm am nächsten liegenden bekannten Funktionswerte $CAL_k(F_i)$ Verschoben. Die Richtung wird dabei durch die jeweiligen Zielfunktionswerte $CAL(F_i)$ vorgegeben, diese werden mit steigender Iterationsanzahl immer besser angenähert.

Die Iteration wird fortgesetzt, bis der Gesamtfehler der bekannten Funktionswerte

$$\begin{aligned} E^{ges}_k = \quad \textstyle\sum_i(\quad & (CAL^L(F_i) - CAL^L_k(F_i))^2 + \\ & (CAL^a(F_i) - CAL^a_k(F_i))^2 + \\ & (CAL^b(F_i) - CAL^b_k(F_i))^2\ )^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \tag{5.9}$$

sich nur noch wenig verringert, d.h wenn E^{ges}_{k-1}-$E^{ges}_k < T$ gilt, wobei $T \geq 0$ ein Schwellwert ist, mit dem man den Trade-Off zwischen der Qualität und der Dauer der Kalibrierung einstellen kann.

Wie oben bereits erwähnt gilt nur $E^{ges}_k \xrightarrow{k\to\infty} \Delta E$, wobei $\Delta E = 0$ nicht notwendigerweise gelten muß. Damit wird $E^{ges}_k < T$ i.A. nicht erreicht. Dies wäre zwar wünschenswert, kann aber von dem vorgestellten Algorithmus nicht geleistet werden. Trotz dieser Einschränkung liefert der Algorithmus gute Ergebnisse, da ein glattes Profil und damit kaum Farbabrisse erzeugt werden. Dies ist für ein optisch ansprechendes Ergebnis von größerer Wichtigkeit, als eine perfekte Approximation der Funktionswerte.

Dieses Verfahren, das die Gewichtung für die Fehlerkorrektur ohne Nutzung der RGB-Abstände ausschließlich aus den L*a*b*-Daten berechnet, mag zunächst etwas ungewöhnlich erscheinen. Aus diesem Grund wurden ebenfalls andere Verfahren getestet, die zur Gewichtung der Mittelwertbildung die Kamera-RGB-Farbwerte der Tableaufelder nutzen.

Diese Algorithmen liefern jedoch schlechtere Ergebnisse als der hier vorgestellte, da die von ihnen erzeugte Approximation der Funktion CAL zum Teil steile Flanken aufweist, die bei der Bildwidergabe als Farbabrisse sichtbar werden. Das liegt an der besonders in den dunklen Farbbereichen stark voneinander abweichenden Farbwahrnehmung von Kamera und Spektralphotometer. An diesen Stellen liefert eine Wertetabelle, deren Interpolation nicht anhand der von der Kamera aufgenommenen RGB-Werte durchgeführt wurde, die bessere Farbkalibrierung.

5.3. Die Tetraederinterpolation

Mit dem in Abschnitt 5.2 erläuterten Algorithmus zur Approximation der Funktion CAL ist es möglich, eine beliebig große Wertetabelle zu generieren und für jeden der möglichen 256^3 Kamera-RGB-Werte einen entsprechenden Funktionswert im CIE-L*a*b*-Raum zu berechnen. In Abschnitt 5.1 wurde allerdings bereits erläutert, daß dies eine zu große Menge an Rechenleistung benötigen würde. Daher beschränkt sich das implementierte Verfahren auf die Berechnung von 32^3 RGB-Farbwerten, die in eine diskrete Wertetabelle eingetragen werden. Diese sind gleichmäßig über den gesamten Farbraum verteilt.

Schon mit diesen 32767 Farben lassen sich für viele Anwendungen im maschinellen Sehen ausreichende Kalibrierergebnisse erzielen, es ist aber auch möglich, durch eine Interpolation der Zwischenwerte die Anzahl der Farben und damit die visuelle Bildqualität nach der Kalibrierung auf Kosten der Bildrate zu erhöhen. Dazu wird die *Tetraederinterpolation* verwendet. Eine ausführliche Beschreibung dieses Interpolationsalgorithmus ist in [22] zu finden.

Die Tetraederinterpolation ist ein Verfahren zur Interpolation einer dreidimensionalen Funktion $f : \mathbb{R}^3 \to X$ aus diskreten Stützstellen, wobei X einen beliebigen Wertebereich darstellen kann. Für die hier benötigte Anwendung wird die Tetraederinterpolation speziell für die Funktion $CAL : [0, \ldots, 255]^3 \to [0, \ldots, 255]^3$ entwickelt, die in einer Wertetabelle an diskreten Stützstellen $(r_i, g_i, b_i), i \in [0, \ldots, n-1]$ bereits vorliegt. Dabei seien die r_i, g_i und b_i zu gewählt, daß $r_0 = g_0 = b_0 = 0$ und $r_{n-1} = g_{n-1} = b_{n-1} = 255$, sowie für alle $i \in [0, \ldots, n-2]$ $r_i < r_{i+1}$, $g_i < g_{i+1}$ und $b_i < b_{i+1}$ gilt. Mittels der Tetraederinterpolation werden dann die Funktionswerte von CAL interpoliert, die nicht auf diesen Stützstellen liegen.

Sei also $(r, g, b) \in [0, \ldots, 255]^3$ beliebig und $D = \{(r, g, b) \mid (r, g, b) \in [0, \ldots, 255]^3,$ $r \in [r_0, \ldots, r_{n-1}]$, $g \in [g_0, \ldots, g_{n-1}]$, $b \in [b_0, \ldots, b_{n-1}]\}$ die Teilmenge der Definitionsmenge von CAL, für die ein Funktionswert $CAL(x \in D)$ bekannt ist. Dann wird $CAL(r, g, b)$ nach dem folgenden Verfahren aus den bekannten Werten interpoliert.

Zunächst werden die acht Elemente der Menge D ermittelt, die den Punkt (r, g, b) von allen Seiten umschließen und in deren konvexer Hülle kein weiterer Wert aus D liegt. Wähle also i, j und k so, daß $r_i \le r < r_{i+1}$, $g_j \le g < g_{j+1}$ und $b_k \le b < b_{k+1}$ gilt. Dann wird der Kubus aus bekannten Stützstellen, der $CAL(r, g, b)$ umgibt, aus den folgenden Funktionswerten gebildet. Seien

$$\begin{aligned}
A &= CAL(r_i, g_j, b_k) \\
B &= CAL(r_{i+1}, g_j, b_k) \\
C &= CAL(r_i, g_{j+1}, b_k) \\
D &= CAL(r_{i+1}, g_{j+1}, b_k) \\
E &= CAL(r_i, g_j, b_{k+1}) \\
F &= CAL(r_{i+1}, g_j, b_{k+1}) \\
G &= CAL(r_i, g_{j+1}, b_{k+1}) \\
H &= CAL(r_{i+1}, g_{j+1}, b_{k+1})
\end{aligned}$$

die Eckpunkte dieses Kubus. Nun ist es durch einfache Gewichtung des Abstandes des Punktes (r, g, b) zu jedem dieser Eckpunkte problemlos möglich, den einen Interpolationswert für (r, g, b) zu ermitteln. Diese Methode ist jedoch langsamer als die hier vorgestellte Tetraederinterpolation und liefert zudem schlechtere Interpolationsergebnisse (siehe hierzu [22]).

Die Tetraederinterpolation verwendet nicht alle Eckpunkte des umschließenden Kubus für die Interpolation des Funktionswertes, sondern teilt den (r, g, b) umschließenden

Kubus (A, B, C, D, E, F, G, H) in sechs isomorphe Tetraeder, die dieselben Eckpunkte haben wie der Kubus. Im Einzelnen sind dies die Tetraeder $T_1 = (A, B, F, H)$, $T_2 = (A, E, F, H)$, $T_3 = (A, E, G, H)$, $T_4 = (A, C, G, H)$, $T_5 = (A, C, D, H)$ und $T_6 = (A, B, D, H)$. Die Interpolation wird dann nur noch auf dem Tetraeder durchgeführt, in dem der Punkt (r, g, b) liegt. Es werden nur die vier entsprechenden Tetraedereckpunkte zur Interpolation verwendet. Abbildung 5.1 stellt schematisch dar, wie der rot eingezeichnete Tetraeder T_6 in einem Kubus mit einheitlicher Kantenlänge liegt.

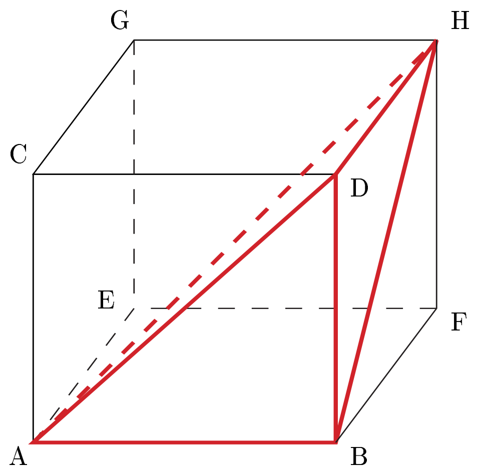

Abbildung 5.1.: Die Lage des Tetraeders T_6 in einem gleichseitigen Kubus.

Dazu muß zunächst festgestellt werden, in welchem der sechs Tetraeder der gesuchte Funktionswert $CAL(r, g, b)$ liegt. Aus der Konstruktion der Tetraeder ergeben sich die unten aufgeführten Bedingungen, mit denen die Lage des Funktionswertes in einem der Tetraeder eindeutig festgelegt werden kann. Zunächst werden die auf das Intervall $[0, \ldots, 1]$ normierten Abstände des Punktes (r, g, b) zum Punkt A mit $\bar{r} = (r - r_i)/(r_{i+1} - r_i)$, $\bar{g} = (g - g_i)/(g_{i+1} - g_i)$ und $\bar{b} = (b - b_i)/(b_{i+1} - b_i)$ bestimmt. Mit Hilfe der Werte $\bar{r}$, $\bar{g}$ und $\bar{b}$ kann nun der Tetraeder ermittelt werden, in dem (r, g, b) liegt, dieser wird durch die folgenden Bedingungen bestimmt:

$$\begin{aligned}
T_1 &: \bar{g} \geq \bar{r} \geq \bar{b} \\
T_2 &: \bar{r} > \bar{g} \geq \bar{b} \\
T_3 &: \bar{r} \geq \bar{b} > \bar{g} \\
T_4 &: \bar{b} > \bar{r} \geq \bar{g} \\
T_5 &: \bar{b} \geq \bar{g} > \bar{r} \\
T_6 &: \bar{g} > \bar{b} > \bar{r}.
\end{aligned}$$

Mit dem Tetraeder sind gleichzeitig die vier Eckpunkte des Kubus festgelegt, aus denen der Interpolationswert berechnet wird.

Um den Wert zu ermitteln muß nun eine sinnvolle Gewichtung der Tetraedereckpunkte festgelegt werden. Dabei muß gewährleistet sein, daß an den Tetraederflächen keine

Unstetigkeiten auftreten. Zusätzlich soll eine in allen drei Dimensionen lineare Interpolation innerhalb des Tetraeders vorgenommen werden. Dies kann erreicht werden, indem jeder Tetraedereckpunkt mit dem Volumen des Tetraeders gewichtet wird, der aus den übrigen drei Eckpunkten und dem zu interpolierenden Wert entsteht.

In Abbildung 5.2 ist der Tetraeder T_1 dargestellt, in dem ein Punkt M liegt, für den ein Interpolationswert berechnet werden soll. Zusätzlich sind zwei der Teiltetraeder dargestellt, mit deren Volumina die Gewichtung der Punkte A (grüner Tetraeder) und H (roter Tetraeder) zur Berechnung des Interpolationswertes für M vorgenommen wird.

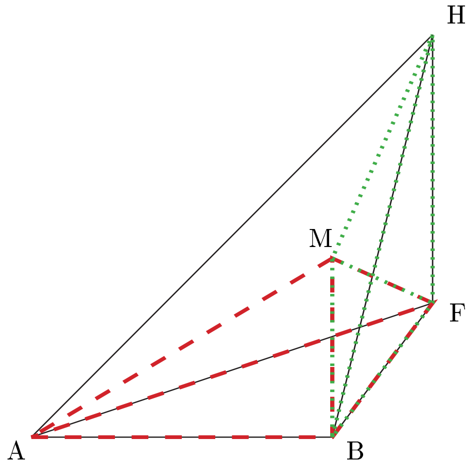

Abbildung 5.2.: Die Lage der Teiltetraeder zur Interpolation des Punktes M im Tetraeder T_1.

Die vier auf diese Weise konstruierten Teiltetraeder füllen den Interpolationstetraeder komplett aus. Der Beweis hierzu wird ebenfalls in [22] gegeben, die Konstruktion beruht auf geometrischen Überlegungen und soll hier nicht weiter erläutert werden. Die mit dieser Methode gewonnene Gewichtung der Eckpunkte ist für die einzelnen Tetraeder gegeben durch

$$
\begin{aligned}
T_1 &: CAL(r,g,b) = (1-\bar{g}) * A + (\bar{g}-\bar{r}) * B + (\bar{r}-\bar{b}) * F + \bar{b} * H \\
T_2 &: CAL(r,g,b) = (1-\bar{r}) * A + (\bar{r}-\bar{g}) * E + (\bar{g}-\bar{b}) * F + \bar{b} * H \\
T_3 &: CAL(r,g,b) = (1-\bar{r}) * A + (\bar{r}-\bar{b}) * E + (\bar{b}-\bar{g}) * G + \bar{g} * H \\
T_4 &: CAL(r,g,b) = (1-\bar{b}) * A + (\bar{b}-\bar{r}) * C + (\bar{r}-\bar{g}) * G + \bar{g} * H \\
T_5 &: CAL(r,g,b) = (1-\bar{b}) * A + (\bar{b}-\bar{g}) * C + (\bar{g}-\bar{r}) * D + \bar{r} * H \\
T_6 &: CAL(r,g,b) = (1-\bar{g}) * A + (\bar{g}-\bar{b}) * B + (\bar{b}-\bar{r}) * D + \bar{r} * H.
\end{aligned}
$$

Durch die lineare Interpolation auf den einzelnen Tetraedern wird die Anzahl der benötigten Multiplikationen für die Interpolation eines Funktionswertes von acht auf vier reduziert. Zudem werden die Sprünge in der zweiten Ableitung der interpolierten Funktion zwischen zwei benachbarten Kuben gegenüber denen verringert, die bei der Interpolation durch Mittelwertbildung aus allen Kubuseckpunkten auftreten. Damit ist die Tetraederinterpolation zum einen schneller, als eine Interpolation über alle acht Ecken des Kubus, und liefert desweiteren an den Kubusübergängen bessere Interpolationswerte mit geringeren Sprüngen in der zweiten Ableitung der interpolierten Funktion.

5.4. Weitere Verfahren zur Berechnung eines Kameraprofils

Da die Berechnung eines des initialen Kameraprofils einer der Kernpunkte dieser Arbeit ist und von der Güte der Wertetabelle die Qualität der Kalibrierung in höchstem Maße abhängt, ist dieser Teil der Arbeit sehr ausführlich untersucht worden. Dabei hat sich der oben dargestellte Algorithmus gegenüber weiteren Ansätzen am besten bewährt. Zwei dieser verworfenen Ansätze werden in diesem Abschnitt kurz angesprochen.

5.4.1. Signalvorentzerrung zur Linearisierung der Helligkeitsrezeption

Zunächst soll die Frage beantwortet werden, warum die im Bereich der Scannerkalibrierung sehr weit verbreitete und auch bereits in Abschnitt 2.5.3 erwähnte Korrektur der Signalvorverzerrung nicht angewandt wird.

Für diese sogenannte *Vorentzerrung* der Kamerawerte wird die Grautreppe des Farbtableaus verwendet. Da sowohl die Grünkomponente der Kamerarezeption als auch der mit dem Spektralphotometer gemessene Y-Wert näherungsweise die Helligkeit eines Graufeldes beschreiben, ergeben sich Stützstellen für die Helligkeitsrezeption der Kamera gegenüber der korrekten Graufeldhelligkeit. Mittels Spline-Interpolation dieser Stützstellen wird eine Kurve erzeugt. Diese gibt an, wie sich die von der Kamera wahrgenommene Helligkeit eines Graufeldes zu dessen tatsächlicher Helligkeit verhält.

Bei der Scannerkalibrierung werden alle vom Scanner eingehenden Daten mit den aus dieser Vorverzerrungskurve gewonnenen Information linearisiert. Nach der Vorentzerrungstransformation sind die vom Scanner erzeugten Graufeldintensitäten proportional zu den spektralphotometrisch ermittelten Intensitätswerten. Damit wird die Anwendbarkeit einer linearen Transformation als erste Näherung für das initiale Kameraprofil gewährleistet.

Für die Videokamerakalibrierung hat sich dieses Verfahren nicht bewährt. Das ist in dem Aussehen der Vorverzerrungskurve der verwendeten Sony-Videokamera begründet, die in Abbildung 5.3 dargestellt ist. Man erkennt, daß diese Kurve angenähert linear verläuft und bei einem Grünwert von 15-20 bereits die x-Achse berührt. Der Grund dafür ist, daß die dunkelste, vom Druckmedium reproduzierbare Farbe immer noch Licht reflektiert.

Das bedeutet, eine wie oben durchgeführte Signalvorentzerrung hat eine sehr starke Quantisierung in den Bildbereichen zur Folge, die unter dieser Schwelle von 20 liegen und die im Kamerabild sehr wohl vorkommen können, da dieses nicht vom Druckmedium der Farbtafel abhängt. Die korrekte Kalibrierung dunkler Farben wird damit für die späteren Teile des Kalibrieralgorithmus wesentlich erschwert. Eine solche Vor-

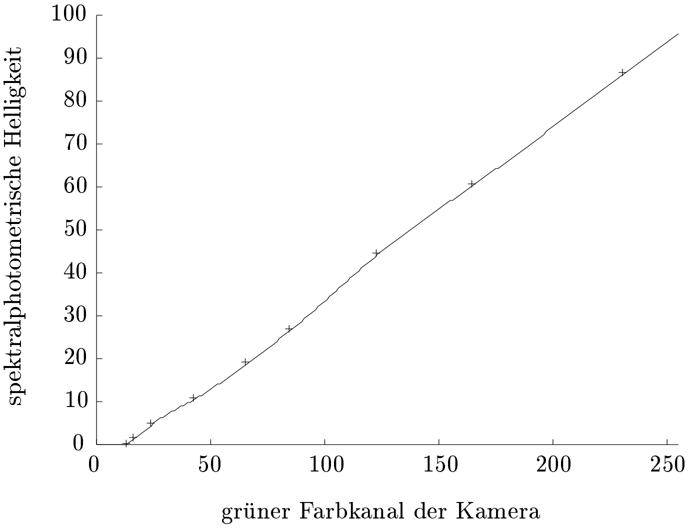

Abbildung 5.3.: Vorverzerrungskurve der verwendeten Sony-Videokamera.

entzerrung wirkt sich daher sehr Ungünstig auf die gesamte Kalibrierung aus. Zudem wird die Einstellung des Schwarzwertes der Kamera durch die spätere Dynamikanpassung an einer geeigneteren Stelle im Ablauf des Kalibrieralgorithmus vorgenommen.

Da die Vorverzerrungskurve der Videokamera ansonsten fast linear verläuft, bringt eine Vorentzerrung zudem keine wesentliche Änderung in den hellen Bildbereichen. Aus diesen Gründen wurde für die Videokamerakalibrierung auf die Vorentzerrung verzichtet.

5.4.2. Interpolation der Kalibrierfunktion auf Basis der RGB-Metrik

Ein weiterer, nicht iterativer Ansatz zur Generierung eines initialen Kameraprofils, der nach ausführlichen Testläufen verworfen wurde, soll ebenfalls kurz erwähnt werden. Dieser führt die Approximation der Daten der Wertetabelle mit einer Gewichtung auf Basis der RGB-Daten durch. Der Algorithmus sucht für einen RGB-Wert, dessen L*a*b*-Funktionswert interpoliert werden soll, die diesem Wert im RGB-Raum am nächsten liegenden Stützstellen. Aus den zugehörigen L*a*b*-Werten wird ein Mittelwert gebildet, der den zu interpolierenden L*a*b*-Wert darstellt. Die Gewichtung wird hierbei mit einer Gaußfunktion vorgenommen, die als Parameter die Abstände der RGB-Werte der Stützstellen vom RGB-Wert des interpolierten L*a*b*-Funktionswertes erhält.

Ein auf diese Weise operierender Algorithmus liefert trotz umfangreicher Tests mit verschiedenen Gewichten und Optionen keine befriedigenden Ergebnisse. Zum einen wirken L*a*b*-Werte, die überproportional häufig vorkommen, als Attraktorzentren. Dies sind bei dem verwendeten Farbtableau z.B. Hautfarben oder Grautöne. Farben, die in der Nähe dieser Häufungen liegen, werden übermäßig stark in Richtung der Stützstellenhäufungen verschoben. Dadurch kommt es in Randbereichen der Gaußfunktion um diese Stützstellenhäufungen zu Farbabrissen. In diesen Bereichen ändert sich die Farbe dann sehr abrupt und es werden Farbabstufungen sichtbar. Zum anderen liefert diese Interpolation auch bei Gleichverteilung der Tableaufelder über den Farbraum schlechtere Ergebnisse, da die Stützstellengewichtung im RGB-Raum geschieht. Daraus resultieren ebenfalls erhebliche Farbverfälschungen.

6. Automatische Anpassung der Kalibrierung an wechselnde Lichtverhältnisse

Bisher wurde ein Verfahren entwickelt, das die Videokamera mit einem festen Kameraprofil auf die umgebenden Beleuchtungsverhältnisse kalibriert. Diese Kalibrierung ist in dem Sinne absolut, daß von konstanten Beleuchtungsverhältnissen nach der Kalibrierung ausgegangen wird. Sonst liefert die Kalibrierung falsche Werte.

Dieser Ansatz ist sicherlich für eine Einzelbild-Digitalkamera sinnvoll. Bei einer Videokamera muß allerdings davon ausgegangen werden, daß sich die Beleuchtungsbedingungen im Laufe der Aufnahme einer Bildsequenz ändern. Daher wird in diesem Abschnitt erläutert, wie man das bestehende Kameraprofil aktiv an Beleuchtungsänderungen anpaßt, damit auch in diesem Fall die Kalibrierung noch gute Werte liefert.

Dazu werden zwei separate, unabhängig voneinander ablaufende Ansätze implementiert. Das ist zum einen die Dynamikanpassung der Kamerawerte, mit der eine Helligkeitsinvarianz erreicht wird und zum zweiten die Weißpunktkorrektur, mit der unabhängig von der Bildhelligkeit der Weißpunkt korrigiert wird.

Die beiden Verfahren gemeinsam erreichen, daß sowohl die Bildhelligkeit als auch die Farben bei variablen Lichtverhältnissen konstant bleiben.

6.1. Dynamikanpassung der Kamerawerte vor Anwendung des Kameraprofils

Um bei unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen oder Blendenöffnungen der Kamera eine einheitliche Bildhelligkeit zu erzielen, hat sich die Normierung des Kamera-Dynamikbereiches auf den maximalen Dynamikbereich $[0, \ldots, 255]$ als sehr robustes Verfahren erwiesen.

Die Dynamikanpassung wird hier mit einer einfachen Histogrammstreckung durchgeführt, die direkt auf die von der Kamera generierten RGB-Daten angewandt wird. Dazu wird zunächst das kumulierte Histogramm H eines Farbbildes f über die drei Farbkanäle gebildet, es gelte

$$H(d) = \sum_{\substack{i \in [0,\ldots,N_x-1],\\ j \in [0,\ldots,N_y-1]}} h_d(R^{i,j}) + h_d(G^{i,j}) + h_d(B^{i,j}) \ . \tag{6.1}$$

Dabei sind $f^{i,j} = (R^{i,j}, G^{i,j}, B^{i,j})$ die Farbwerte der einzelnen Bildpunkte und (N_x, N_y)

ist die Bildgröße von f. Die Funktion h_d ist definiert durch

$$h_d(x) = \begin{cases} 1 & \text{falls } x = d \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \tag{6.2}$$

Aus diesen Histogramminformationen werden zwei Schwellwerte t_h und t_l ermittelt, für die gelten muß

$$\begin{aligned} t_l &= \min_{i \in [0,\dots,255]} \left(\frac{\sum_{k=0}^{i} H(k)}{\sum_{k=0}^{255} H(k)} > 0,01 \right) \qquad \text{und} \\ t_h &= \max_{i \in [0,\dots,255]} \left(\frac{\sum_{k=i}^{255} H(k)}{\sum_{k=0}^{255} H(k)} > 0,0075 \right) . \end{aligned} \tag{6.3}$$

Die Schwellwerte von 1% und 0.75% sind dabei empirisch ermittelt. Mit dieser Parametereinstellung werden in Abschnitt 8.1 ermittelten Kalibrierfehler minimiert, der kalibrierte Wert für die Helligkeit L^* stimmt am besten mit dem spektralphotometrisch gemessenen Wert überein.

Die Dynamikanpassung ist dann eine einfache lineare Streckung der RGB-Werte. Es wird eine Wertetabelle mit 256 Einträgen implementiert, die von allen drei Farbkanälen gleichermaßen verwendet wird, so daß zwar die Bildhelligkeit, nicht aber die Farbe des Bildes verändert wird. Die diskrete Funktion v, die hier verwendet wird, ist gegeben durch

$$v(f^{i,j}) = \frac{245}{t_h - t_l}(f^{i,j} - t_l) + 5 \, . \tag{6.4}$$

Damit werden die Farbwerte des Bildes, die zwischen t_l und t_h liegen, auf den Bereich 5 bis 250 gestreckt. Die Farbbereiche < 5 und > 250 bleiben den Histogrammbereichen vorbehalten, die t_h über- bzw. t_l unterschreiten.

Durch die Wahl der Schwellwerte t_h und t_l wird gewährleistet, daß der Histogrammbereich, in dem fast alle Bildpunkte des aufgenommenen Bildes liegen, auf den gesamten Histogrammbereich gestreckt und somit die Helligkeit des Bildes konstant gehalten wird. Werte, die aus diesem Histogrammbereich herausfallen, wie z.B. kleine Glanzlichtbereiche, werden dabei ignoriert, um die Anpassung der Bildhelligkeit robuster zu machen.

6.2. Die Kries-Transformation zur Weißpunktkorrektur

Das menschliche Auge ist zu einer sehr weitreichenden Farbadaption fähig. Wird eine Szene mit wechselnder Beleuchtung angestrahlt, so weisen die Farben der Objekte in dieser Szene für einen Betrachter trotzdem nur geringe Unterschiede auf. Diese automatische Adaption der Farbwahrnehmung des menschlichen Auges soll in diesem Abschnitt modelliert werden. Dazu wird ein Verfahren angewandt, daß von J.v.Kries [16] erstmals vorgeschlagen wurde.

Kries nutzt bei der Modellierung der Farbadaption aus, daß die Farbwahrnehmung des Menschen nach der Young-Helmholtzschen Dreikomponententheorie (vgl. Abschnitt 2.1) auf der Wahrnehmung von nur drei unterschiedlichen Parametern beruht. Nach Kries müßte die Adaption des Auges an eine Beleuchtungsänderung sich durch einen Vektor beschreiben lassen, der die Empfindlichkeitsänderung der drei Zapfenarten bei der Farbanpassung des menschlichen Auges modelliert. Dieses Modell läßt sich für die Farbumstimmung eines digitalen Kamerabildes verwenden und soll hier beschrieben werden.

Die Kries-Transformation zur Umstimmung der Kalibrierung auf unterschiedliche Beleuchtungsbedingungen basiert auf der in Kapitel 2 angesprochenen linearen Transformierbarkeit des CIE-XYZ-Farbraumes in den PDT-Vektorraum des menschlichen Farbensehens. Um die Kalibrierung an eine neue Beleuchtung anzupassen, wird, entsprechend dem Modell, jeder von der Kamera aufgenommene und mit dem aktuellen Kameraprofil kalibrierte Farbwert vom CIE-XYZ-Raum in den PDT-Raum transformiert. Dort wird eine Empfindlichkeitsänderung der Farbrezeptoren durch Skalierung der p-, d- und t-Farbwerte vorgenommen. Anschließend werden die modifizierten PDT-Farbvektoren wieder in den XYZ-Raum rücktransformiert. Die PDT-Spektralwertkurven sind in Abschnitt 2.1 in der Abbildung 2.2 dargestellt.

Hier wird die Kries-Transformation in einer Form angegeben, die zwar den Weißpunkt, nicht aber die Helligkeit des Bildes ändert. Die Anpassung der Bildhelligkeit wurde schon durch die Dynamikanpassung im vorigen Abschnitt vorgenommen.

6.2.1. Die Weißpunktkorrektur

Bevor im folgenden Abschnitt auf den Algorithmus eingegangen wird, muß zunächst erläutert werden, was eine Weißpunktkorrektur ist, und was sie bezwecken soll. Dazu sei an dieser Stelle noch einmal auf die RGB-Farbtafel verwiesen, die in Abbildung 2.5 in Abschnitt 2.3.1 dargestellt ist. In dieser Tafel ist der Unbuntpunkt an der Stelle $r = g = b = \frac{1}{3}$ deutlich zu erkennen. Dieser Unbuntpunkt wird bei dreidimensionaler Darstellung des Farbraumes zu einer Unbuntgeraden, z.B. verbindet in der Abbildung 2.4 die Unbuntgerade die weiße und die schwarze Ecke des RGB-Farbwürfels. Eine solche Funktion zur Beschreibung der Unbuntpunkte existiert in jedem Farbraum, und es ist wichtig, daß bei einer Farbraumtransformation diese unbunten Bereiche der Farbräume genau aufeinander abgebildet werden.

Eine Unbuntgerade existiert in Farbräumen, die linear in den CIE-XYZ-Raum transformierbar sind. In jedem anderen Farbraum kann von der Existenz einer Unbuntfunktion ausgegangen werden, diese ist i.A. allerdings keine Gerade. Die von der CCD-Kamera bei der Aufnahme des Kamerabildes implizit vorgenommene Abbildung der Umgebung auf den RGB-Raum ist eine nichtlineare stetige Funktion, d.h. die Unbuntfunktion ist in diesem Fall eine stetige Kurve. Diese Kurve wird durch die Kalibrierung mit dem initialen Kameraprofil auf die Unbuntgerade im CIE-XYZ-Farbraum bei $x = y = z$ abgebildet.

Durch eine Beleuchtungsänderung während der Bildakquisition kann es vorkommen, daß unbunte Objekte in der aufgenommenen Szene nicht mehr auf die Unbuntgerade des CIE-XYZ-Farbraumes abgebildet werden. Die Abbildung erfolgt auf eine andere stetige Funktion innerhalb des CIE-XYZ-Raumes, die für geringe Beleuchtungsänderungen allerdings angenähert eine Gerade darstellen sollte. So kann, wenn das initiale Kameraprofil unter weißem Licht erstellt wurde, z.B. eine weiße Fläche bei einer Beleuchtungsverschiebung zum rötlichen Licht in der kalibrierten XYZ-Repräsentation des Kamerabildes einen Farbton aufweisen, der von der Bedingung für einen unbunten Farbton $x = y = z$ deutlich entfernt ist.

Das Ziel der Weißpunktkorrektur sollte es also sein, die Kurve im CIE-XYZ-Farbraum, auf der unbunte Umgebungsfarben nach der Beleuchtungsänderung liegen, zu verschieben. Dies sollte so geschehen, daß sich diese Kurve anschließend mit der Unbuntgeraden des CIE-XYZ-Raumes deckt. Zu diesem Zweck soll eine lineare Transformation verwendet werden, um den Berechnungsaufwand zu minimieren. Es wird damit angenommen, daß sich durch eine Beleuchtungsänderung die Repräsentation der unbunten Bildpunkte im CIE-XYZ-Farbraum zwar verschiebt, aber immer noch auf eine Gerade abgebildet wird, die zu der definierten Unbuntgeraden im XYZ-Farbraum parallel verläuft. In Abschnitt 1.4 wurde bereits die Arbeit von Kollhoff und Kempe erwähnt [10], in der gezeigt wird, daß diese Annahme zu guten Ergebnissen führt. Trotzdem soll noch einmal herausgestellt werden, daß es sich bei der verschobenen Repräsentation unbunter Umgebungsfarben nicht notwendigerweise um eine Gerade handelt. Die lineare Transformation zur Korrektur der Unbuntrepräsentation kann somit keine exakte Adaption liefern. Durch diese Transformation werden unbunte Umgebungsfarben mit der Unbuntgeraden des CIE-XYZ-Raumes nur in einem Punkt, dem Weißpunkt, zur Überdeckung gebracht.

Dabei ist es unerheblich, welche Helligkeit zur Weißpunktkorrektur verwendete Unbuntpunkt aufweist. Da die Weißpunktkorrektur mit den relativen Werten $\frac{r}{g}$ und $\frac{b}{g}$ berechnet wird, ist es aber sinnvoll, einen möglichst hellen Weißpunkt zu wählen, da diese Bruchterme umso genauer sind, je größer die Werte r, g und b gewählt werden.

Um mit diesen Einschränkungen eine möglichst gute Farbumstimmung des gesamten Bildes bei der Verschiebung des Weißpunktes zu erhalten, wird eine lineare Transformation verwendet, die zu diesem Zweck die Empfindlichkeitsänderungen des menschlichen Auges modelliert, die Kries-Transformation.

6.2.2. Das mathematische Modell der Kries-Transformation

Die Voraussetzung für die Anwendung der Kries-Transformation ist das Vorhandensein zweier Weißpunkte im CIE-XYZ-Farbraum. Einer dieser Punkte ist ein im Kamerabild lokalisierter Weißpunkt, also die kalibrierte Darstellung einer unbunten Umgebungsfarbe. Dieser muß mit der aktuellen Kalibrierung in den CIE-XYZ-Raum transformiert worden sein, er wird durch die Transformation aber i.A. nicht auf einen unbunten Punkt mit $x = y = z$ abgebildet, sonst wäre keine Weißpunktkorrektur nötig. Desweiteren muß ein Unbuntpunkt im CIE-XYZ-Raum bekannt sein, auf den die XYZ-Repräsentation des Kamera-Weißpunktes abzubilden ist.

Sei also W_k^{RGB} die Kameraantwort auf eine unbunte Umgebungsfarbe und $W_k = (x_k, y_k, z_k)^T$ das Ergebnis der Transformation von W_k^{RGB} in den CIE-XYZ-Farbraum. Zudem sei $W_o = (x_o, y_o, z_o)^T$ ein Punkt auf der Unbuntgeraden des CIE-XYZ-Raumes. Diese Punkte W_k und W_o werden zunächst auf den Y-Wert normiert. Es werden

$W_k' = (\frac{x_k}{y_k}, 1, \frac{z_k}{y_k})^T$ und $W_o' = (\frac{x_o}{y_o}, 1, \frac{z_o}{y_o})^T$ gebildet, so daß die Weißpunkte W_k' und W_o' unabhängig von der Bildhelligkeit nur noch das Verhältnis der drei Farbkomponenten x, y und z zueinander darstellen.

Durch die Kries-Transformation wird die Kalibrierfunktion CAL nun dahingehend modifiziert, daß $\exists_{c \in \mathbb{R}} : CAL(W_k^{RGB}) = c \cdot W_o'$ gilt. Zumindest in diesem Punkt liegt nach der Transformation ein Unbuntpunkt des Kamera-RGB-Raumes auf der Unbuntachse des CIE-XYZ-Raumes. Für alle anderen Unbuntpunkte des Kamera-RGB-Raumes kann die Lage auf der Unbuntgeraden des CIE-XYZ-Raumes nur angenähert gewährleistet werden. Formal läßt sich die Kries-Transformation unter diesen Voraussetzungen wie folgt darstellen:

Zunächst wird eine Matrix A benötigt, die die Umrechnung von Werten aus dem CIE-XYZ- in den PDT-Farbraum des menschlichen Auges vornimmt. Diese Matrix hat nach Hunt [32] die Koeffizienten

$$A = \begin{pmatrix} 0.39 & 0.69 & -0.08 \\ -0.23 & 1.18 & 0.05 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{pmatrix} . \tag{6.5}$$

Mit dieser Matrix A werden beide normierten Weißpunktvektoren in den PDT-Farbraum überführt, es gelte $a_k = (p_k, d_k, t_k)^T = A \cdot W_k'$ und $a_o = (p_o, d_o, t_o)^T = A \cdot W_o'$.

Mit diesen beiden Vektoren läßt sich eine lineare Farbumstimmung im PDT-Raum durchführen. Sei die Matrix U definiert durch

$$U = \begin{pmatrix} \frac{p_o}{p_k} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{d_o}{d_k} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{t_o}{t_k} \end{pmatrix} . \tag{6.6}$$

Die Matrix M zur Farbumstimmung eines Vektors vom alten auf den neuen Weißpunkt ergibt sich dann mit

$$M = A^{-1} \cdot U \cdot A \, . \tag{6.7}$$

Mit der auf diese Weise berechneten Matrix M kann nun die Weißpunktkorrektur für beliebige Farbwerte des Kamera-XYZ-Raumes vorgenommen werden.

6.3. Ermitteln des Weißpunktes eines beliebigen Kamerabildes

Das Finden eines unbunten Pixels in einem beliebigen Farbbild ist eine schwer zu lösende Aufgabe, die in der vorliegenden Arbeit zusätzlich in Videoechtzeit erfolgen soll. Damit sind keine zeitraubenden Untersuchungen des Kamerabildes, wie z.B. eine robuste Segmentierung, möglich. Es muß also ein Ansatz gefunden werden, der möglichst wenig Rechenaufwand benötigt. Aus diesen Überlegungen wird folgende Methode implementiert, die in der Literatur mit dem Schlagwort „Grey World Assumption" bezeichnet wird. Dieses Verfahren geht von der Annahme aus, daß der mittlere Farbton eines beliebigen Kamerabildes unbunt ist. Mit zusätzlichen Einschränkungen bei der Wahl der zur Mittelwertbildung verwendeten Farbwerte erzielt der hier angewandte Algorithmus gute Ergebnisse.

Wie oben erläutert soll ein Algorithmus implementiert werden, der eine geringe Rechenzeit erfordert. Daher ist es sinnvoll, Operationen zur Berechnung des Weißpunktes auf dem Histogramm des aktuellen Kamerabildes anstatt auf dem Bild selbst durchzuführen. Es gibt mehrere Möglichkeiten das Histogramm eines Farbbildes zu erstellen. Ein typisches RGB-Farbbild hat ein dreidimensionales Histogramm, daß eine Größe von 256^3 Einträgen hätte. Die Generierung eines solchen Histogramms und die Anwendung von Algorithmen auf diesem wäre zu aufwendig für eine Videoechtzeitanwendung. Daher werden die Histogramme der drei einzelnen Farbkanäle gebildet. Auch diese werden nicht vollständig generiert, es wird eine Unterabtastung angewandt, die nur jedes vierte Pixel des Bildes in die Histogramme einfließen läßt. Zusätzlich werden nur Bildpunkte berücksichtigt, die bestimmte Kriterien erfüllen.

Eines dieser Kriterien ist, daß keiner der Farbkanäle einen Farbwert von 255, also den maximalen von der Kamera generierbaren Farbwert aufweist. Damit wird ausgeschlossen, daß in einzelnen Farbkanälen überbelichtete Pixel berücksichtigt werden, da eine Einbeziehung durch Signalkappung verzerrter Farbwerte eine systematische Verschiebung des Weißpunktes zur Folge hätte. Ebenso sollen Bildpunkte ausgeschlossen werden, die zu dunkel sind, um verläßliche Informationen über den Weißpunkt zu liefern, sowie Bildpunkte, bei denen einzelne Farben nur sehr schwach auftreten und die daher sehr stark gefärbt sein müssen. Aus diesem Grund werden auch Pixel ausgeschlossen, bei denen mindestens ein Farbkanal einen RGB-Wert von weniger als 100 aufweist. Aus den übrigen Bildpunkten werden die drei Farbhistogramme gebildet.

Aus diesen Farbhistogrammen wird anschließend ein Mittelwert für jede Farbe errechnet, der eine Näherung für den Weißpunkt W des untersuchten Bildes ist. Es gilt $W = (W_R, W_G, W_B)$ mit

$$W_\alpha = \sum_{\substack{i\in[0,\dots,N_x-1],\\ j\in[0,\dots,N_y-1],\\ d\in[100,\dots,254]}} d \cdot \alpha_d(f^{i,j}) \Bigg/ \sum_{\substack{i\in[0,\dots,N_x-1],\\ j\in[0,\dots,N_y-1]}} RGB(f^{i,j}) \,. \tag{6.8}$$

Die Notation deckt sich zum Großteil mit der in Abschnitt 6.1 verwendeten, zusätzlich ist $\alpha \in (R, G, B)$ und die Funktionen $\alpha_d(x)$, also $R_d(x)$, $G_d(x)$ und $B_d(x)$, sowie $RGB_d(x)$ sind definiert durch

$$\begin{aligned}
R_d(r,g,b) &= \begin{cases} 1 & \text{falls } r = d \ \vee \ 100 < r,g,b < 255 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} ,\\
G_d(r,g,b) &= \begin{cases} 1 & \text{falls } g = d \ \vee \ 100 < r,g,b < 255 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} ,\\
B_d(r,g,b) &= \begin{cases} 1 & \text{falls } b = d \ \vee \ 100 < r,g,b < 255 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} ,\\
RGB(r,g,b) &= \begin{cases} 1 & \text{falls } 100 < r,g,b < 255 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} .
\end{aligned}$$

Die hier vorgestellte Methode erzeugt einen mittleren Weißpunkt des Bildes und hat gegenüber dem Auffinden eines tatsächlichen Unbuntpunktes im Kamerabild einen entscheidenden Vorteil. Es wird nicht ein regionaler Weißpunkt gefunden, sondern ein Mittelwert aller unbunten Flächen des Bildes. Daher wird bei unterschiedlichen Beleuchtungsverhältnissen in verschiedenen Bildbereichen nicht nur einen Bildbereich gut kalibriert, die Kalibrierung wird auf einen mittleren Weißpunkt eingestellt.

Problematisch ist dabei natürlich, daß im Bild vorhandene Farbinformationen sowohl von einer gefärbten Beleuchtung, als auch von gefärbten Bildinhalten stammen können. Die Annahme, daß der mittlere Farbwert aller im Bild enthaltenen Gegenstände für jede Szene unbunt ist, scheint optimistisch. Andererseits ist eine Unterscheidung zwischen einem gefärbten Bildhintergrund und einem mit gefärbtem Licht angestrahlten weißen Hintergrund ohne weitgehende Bildverarbeitung nicht möglich. Zudem stellen Verfahren, die die Spektralverteilung des Umgebungslichtes berechnen, oft sehr schwer zu erfüllende Ansprüche an die aufgenommene Szenerie und den Versuchsaufbau und sind schon dadurch nicht für das hier implementierte Verfahren geeignet.

So ist z.B. für eine Glanzlichtanalyse, die einen interessanten Ansatz zur Bestimmung der Beleuchtungsfarbe darstellt, i.A. eine umfangreiche Segmentierung des Bildes erforderlich, die nicht in Videoechtzeit durchzuführen ist. Zudem ist das Vorhandensein mehrerer Objekte nötig, die Glanzlichter erzeugen. Auch dies kann für ein unter Realweltbedingungen robustes Verfahren nicht vorausgesetzt werden. Auf weiterführende Literatur zu diesem Thema wird von Koschan in [6] verwiesen.

7. Ablauf der Kamerakalibrierung

Nachdem in den vorhergehenden Kapiteln die Algorithmen des in dieser Arbeit entwickelten Kamerakalibrierverfahrens detailliert erläutert wurden, soll in diesem Kapitel deutlich gemacht werden, in welchem Zusammenhang sie stehen und an welcher Stelle der Kalibrierung sie zur Anwendung kommen. Dazu wird der Ablauf der Kalibrierung als Flußdiagramm dargestellt und zusätzlich auf die Feinheiten der Implementierung des Kalibrieralgorithmus sowie der Adaptivität eingegangen.

Das Kalibriersystem ist in zwei Teile gegliedert, die unabhängig voneinander ablaufen. Daraus ergeben sich zwei unterschiedliche Kalibrierabläufe die separat betrachtet werden sollen. Die erste Variante ist die Kalibrierung nur unter Verwendung des initialen Kameraprofils aus Kapitel 5. Als zweites wird die Kalibrierung mit zusätzlicher automatischer Anpassung an wechselnde Lichtverhältnisse mit den Algorithmen aus Kapitel 6 betrachtet.

Die beiden beschriebenen Varianten der Kalibrierung werden im folgenden Kapitel 8 für die Auswertung verwendet. Alle dort dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf einen dieser Abläufe.

7.1. Ablauf der Kalibrierung ausschließlich mit dem initialen Kameraprofil

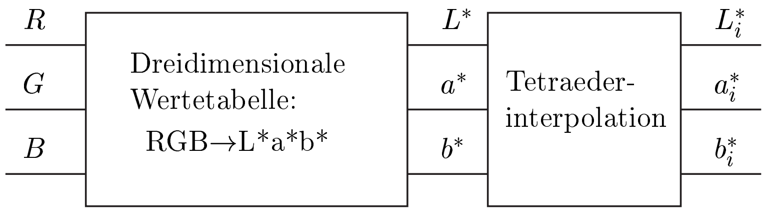

Abbildung 7.1.: Ablauf der nicht adaptiven Kalibrierung.

Der genaue Ablauf der Kamerakalibrierung mit dem initialen Kameraprofil ist in Abbildung 7.1 schematisch dargestellt. Dieser Ablauf ist einfach und besteht ausschließlich aus einer Look-Up-Operation mit dem initialen Kameraprofil, also der in Kapitel 5.2 generierten dreidimensionalen Wertetabelle. Die RGB-Werte werden nur mittels dieser einen Operation in L*a*b*-Werte umgerechnet. Anschließend kann zur Bildverbesserung die in 5.3 beschriebene Tetraederinterpolation verwendet werden, mit der die Farbquantisierung kompensiert wird, die durch die Auflösung der Wertetabelle von nur $2^5 \cdot 2^5 \cdot 2^5$ Farbwerten entsteht. Dies ist allerdings nur für Anwendungen sinnvoll, die eine hohe optische Bildqualität erfordern. Der Einfluß auf die Berechnung der Kalibrierfehler ist aufgrund der hierbei durchgeführten Mittelwertbildung nur gering.

Eine auf diese Weise durchgeführte Kalibrierung ist keineswegs beleuchtungsinvariant. Die Kalibrierergebnisse liefern keine Farbkonstanz unter variablen Beleuchtungsbedingungen, es wird ausschließlich die Beleuchtungssituation optimal kalibriert, unter der das initiale Kameraprofil erzeugt wurde. Jedes von der Kamera erzeugte Bild wird ohne Variation mit dem initialen Kameraprofil in den CIE-L*a*b*-Raum umgerechnet.

7.2. Ablauf der Kalibrierung mit automatischer Profilanpassung

Der Ablauf der Kalibrierung mit automatischer Profilanpassung ist in Abbildung 7.2 dargestellt. Dieser Ablauf enthält zusätzlich zur Kalibrierung aus Abbildung 7.1 weitere Schritte, die die Profilanpassung an variable Beleuchtung realisieren. Diese liegen in den eindimensionalen Wertetabellen $\boxed{\text{1D-LUT}}$, die vor dem initialen Kameraprofil durchlaufen werden und mit deren Hilfe die Dynamikanpassung realisiert wird, sowie in der 3×3 - Matrix zur Weißpunktkorrektur. Hinzu kommt noch eine Umrechnung zwischen CIE-L*a*b* und CIE-XYZ, da die Korrektur des Weißpunktes nur auf einem zum PDT-Farbraum des menschlichen Auges linearen Farbraum durchgeführt werden kann (s. Abschnitt 6.2).

Da der Kalibrierablauf aus Abbildung 7.2 auf diskreten Eingabewerten operiert, kann die Operationenfolge, mit Ausnahme der Tetraederinterpolation, ohne Qualitätsverlust durch eine einzige dreidimensionale Wertetabelle ersetzt werden, die durch Hintereinanderausführung der einzelnen Operationen auf alle möglichen Eingabewerte berechnet wird. Dadurch wird bei jeder Look-Up-Operation, die auf einem Kamerabild durchgeführt wird, Rechenzeit eingespart.

7.2.1. Das Zusammenspiel der Einzelalgorithmen

An dieser Stelle soll noch einmal kurz auf die Reihenfolge der nacheinander ausgeführten Algorithmen eingegangen werden. Dabei soll insbesondere erläutert werden, weshalb gerade die gewählte Reihenfolge vernünftig erscheint.

In einem ersten Schritt werden drei eindimensionale Wertetabellen auf die von der Kamera generierten RGB-Daten angewandt. Diese $\boxed{\text{1D-LUT}}$ -Tabellen enthalten die diskrete, auf allen drei Kanälen gleiche Dynamikanpassung des Kameraprofils, die in Abschnitt 6.1 erläutert wurde. Vor jeder anderen Operation werden die Bilddaten auf den maximalen Dynamikumfang umgerechnet.

Dieser Schritt wird noch auf den RGB-Daten durchgeführt, da z.B. eine einfache Aufhellung des Bildes im L*a*b*-Raum nicht möglich ist, ohne gleichzeitig zu blasse Farben zu erzeugen. Da die von der Kamera generierten RGB-Werte zudem in der Helligkeit linear zu den XYZ-Zielwerten der Kalibrierung verlaufen (s. Abschnitt

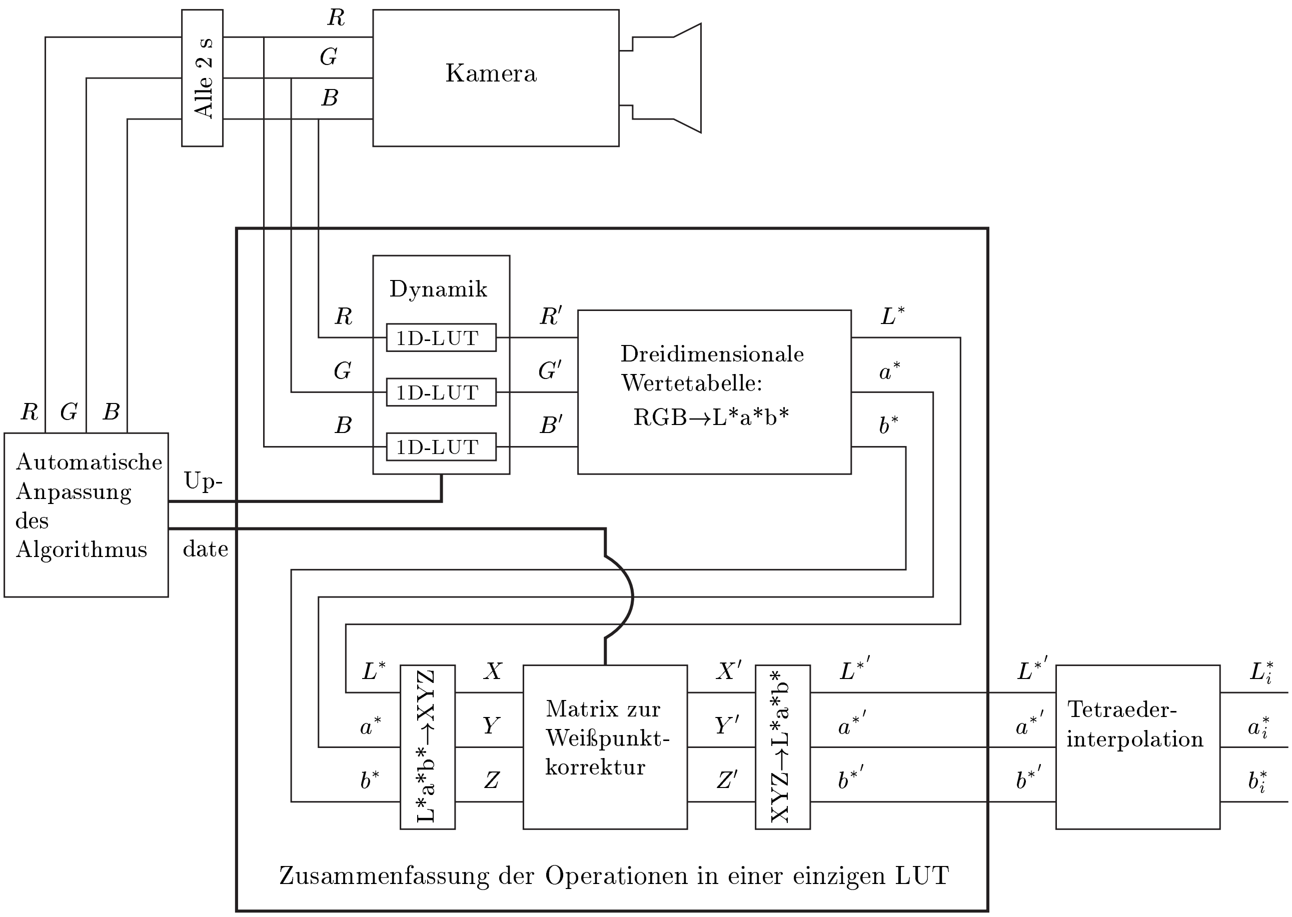

Abbildung 7.2.: Ablauf der Kalibrierung mit automatischer Profilanpassung.

5.4.1), ist eine Histogrammstreckung in dieser frühen Phase der Kalibrierung möglich und das initiale Kameraprofil in Form der dreidimensionalen Wertetabelle ist trotz der Streckung anwendbar.

Die auf diese Weise im Dynamikumfang angepaßten Daten werden in einem zweiten Schritt mit dem initialen Kameraprofil farbmetrisch kalibriert. Nach dieser Kalibrierung liegen L*a*b*- und damit ebenso XYZ-Daten vor, die sich in etwa linear zur PDT-Farbwahrnehmung des menschlichen Auges verhalten.

Aus diesem Grund ist es an dieser Stelle möglich, die Weißpunktanpassung aus Abschnitt 6.2 durchzuführen. Dazu werden die bereits generierten L*a*b*-Daten vorübergehend in XYZ-Daten zurückgewandelt. Durch die Weißpunktkorrektur wird der Weißpunkt des Bildes auf den Weißpunkt der Normlichtart D50 verschoben, um trotz einer Umstellung des Umgebungslichtes die Kalibrierung auf diese Lichtart zu erreichen. Nach einer Rücktransformation der kalibrierten XYZ-Daten nach L*a*b* ist die Kalibrierung abgeschlossen. Anschließend kann auf das kalibrierte Bild die Tetraederinterpolation angewandt werden.

7.2.2. Die Implementation der automatischen Anpassung

Die neu hinzugekommenen adaptiven Elemente im Kalibrierablauf werden während der Kalibrierung in regelmäßigen Abständen neu berechnet und damit an die aktuellen Beleuchtungsverhältnisse angepaßt.

Diese Anpassung ist in einem separaten Prozeß implementiert, der während der laufenden Kalibrierung regelmäßig in einem festgelegten Zeitintervall aufgerufen wird. Als Zeitintervall hat sich hierbei in Testläufen ein Aufruf in zwei Sekunden bewährt. Die größere Verzögerung, die durch diesen Aufruf zwischen der Darstellung von zwei kalibrierten Kamerabildern entsteht, ist auf dem verwendeten Rechnersystem nicht wahrnehmbar.

In diesem festgelegten Zeitintervall wird ein Algorithmus aufgerufen, der das aktuelle unbearbeitete Kamerabild in einen festgelegten Speicherbereich kopiert. Dadurch kann die Darstellung der von der Kamera generierten Bilder unter Kalibrierung mit den alten Parametern fortgesetzt werden, während ein separater Prozeß die Bildverarbeitung zur Berechnung der neuen Parameter für die automatische Anpassung des Profils im Hintergrund durchführt. Dieser zweite Algorithmus arbeitet ausschließlich auf dem kopierten Kamerabild und ist damit unabhängig vom Darstellungsprozeß. Sobald dieser Rechenprozeß die nötigen Parameter für eine Anpassung der 1D-LUT - Tabellen zur Dynamikanpassung und der 3×3 - Matrix zur Weißpunktkorrektur berechnet hat, erhält der Darstellungsprozeß eine Meldung, die ihn auffordert, diese neuen Parameter zu übernehmen und für die Ausgabe aller weiteren Bilder zu verwenden.

Der Darstellungsprozeß generiert als Reaktion auf diese Meldung unter Zuhilfenahme des initialen Kameraprofils eine neue dreidimensionale Wertetabelle zur Kalibrierung der Kamerabilddaten. Dazu wird für jeden der 32^3 RGB-Farbwerte, für die diese Wertetabelle eine L*a*b*-Repräsentation liefern soll, die gesamte Algorithmenfolge zur Profilanpassung berechnet und nur das Endergebnis vor der Tetraederinterpolation als kalibrierter Farbwert gespeichert, so daß bei der nachfolgenden Farbbildkalibrierung trotz der Anpassung nur eine einzige Look-Up-Operationen mit eventuell nachfolgender Tetraederinterpolation durchgeführt wird.

Damit wird ein erheblicher Zeitvorteil gegenüber der Anwendung der gesamten Operationsfolge auf jedes einzelne Pixel der Kamerabilder erreicht. Um ein Bild zu kalibrieren müßte bei einer Bildgröße von 768×574 die Operationsfolge genau 440.832 mal durchlaufen werden. Für die Umrechnung der Wertetabelle reichen $32^3 = 32.768$ Berechnungen aus. Man erreicht also durch diese Verrechnung der Einzelschritte schon bei der Anwendung des Algorithmus auf nur ein einziges Kamerabild einen signifikanten Zeitvorteil (etwa Faktor 13.5).

8. Auswertung des Kalibrierverfahrens

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Kamerakalibrierung erläutert. Dazu werden unterschiedliche Verfahren entwickelt, die sich in die zwei Anwendungsgebiete einordnen lassen, für die die farbmetrische Kalibrierung eines Kamerabildes interessant ist (vgl. Kapitel 1).

In Abschnitt 8.1 wird zunächst ein Verfahren beschrieben, das die farbmetrische Qualität der Kalibrierung untersucht. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Überprüfung, wie exakt bekannte Farbwerte mit der Kamerakalibrierung rekonstruiert werden können. Die Ergebnisse dieser Auswertung werden separat für die Kamerakalibrierung mit konstanter Beleuchtung (Abschnitt 8.1.3) und für die automatische Anpassung der Kalibrierung bei wechselnden Lichtverhältnissen (Abschnitt 8.1.4) untersucht. In Abschnitt 8.1.6 wird dann ein Vergleich dieser Ergebnisse mit weiteren farbmetrischen Kalibrierverfahren anderer Autoren durchgeführt. Diese Daten sind interessant für eine mögliche Anwendung des Verfahrens im Color-Management-Bereich. Sie sagen allerdings nicht viel über den visuellen Qualitätseindruck aus, den ein Betrachter der untersuchten Kalibrierung zuschreiben würde.

Um diese Lücke zu schließen wird in Abschnitt 8.2 eine optische Auswertung der kalibrierten Bilder durchgeführt, indem einige Bilder dargestellt sind, die subjektiv von Betrachter bewertet werden können.

In Abschnitt 8.3 wird auf die Geschwindigkeit der adaptiven Kalibrierung eingegangen, die durch die Bildrate der auf dem Monitor während der Kalibrierung dargestellten Bildfolge bewertet wird.

Im Anschluß erfolgt eine Untersuchung von näher mit dem maschinellen Sehen verwandten Aufgabenstellungen. In Abschnitt 8.4 wird versucht, Hautfarbtöne mittels Farbkalibrierung beleuchtungsinvariant zu lokalisieren. Hierbei wird die Größe des CIE-L*a*b*-Teilraumes untersucht, in dem die Hautfarben nach der Bildkalibrierung liegen. Dieses Thematik lehnt sich eng an die von V. Krüger während der Entwicklungsarbeit zu [35] durchgeführten Untersuchungen zur Einordnung und Lokalisation von Hautfarben im HSV-Farbraum. Diese Untersuchungen lassen sich einfach auf beliebige Farben übertragen und werden an dieser Stelle nur exemplarisch für die Hautfarbtöne durchgeführt.

Ebenso aus dem Bereich des maschinellen Sehens stammt die Methode der Objektklassifizierung mittels *Color Indexing*, die in Abschnitt 8.5 in Kombination mit vorheriger Farbkalibrierung untersucht wird. In dieser Untersuchung geht es um die verbesserte beleuchtungsinvariante Zuordnung eines abgebildeten Objektes zu einem in einer Bilddatenbank vorhandenen Abbild des Gegenstandes.

8.1. Verfahren zur Bestimmung der farbmetrischen Qualität der Kalibrierung

Bei der Auswertung der Qualität von bildverbessernden Maßnahmen tritt generell das Problem auf, daß deren Bewertung meist nur subjektiv mit Termini wie „Sieht gut aus" oder „Sieht besser aus als..." erfolgen kann. Um dieses Problem zu umgehen, soll hier zunächst keine visuelle Bewertung des erzielten Ergebnisses erfolgen. Eine „gute Kalibrierung" muß also nicht zwangsläufig das für jeden Betrachter optisch beste Ergebnis liefern. Die optische Auswertung anhand von Beispielbildern schließt sich im nächsten Abschnitt 8.2 an.

Die Bewertung der Kalibrierung wird erzielt, indem eine Farbtafel mit definierten Farbfeldern aus dem Kamerabild extrahiert wird. Die zur Auswertung extrahierte Tafel unterscheidet sich bewußt von der zur Kalibrierung verwendeten. Eine Messung, die nur an den zur Kalibrierung verwendeten Stützstellen erfolgt, liefert bessere Übereinstimmungen mit den Sollwerten, als eine Messung an beliebigen Stellen. Sie kann daher nicht repräsentativ für die Qualität der Kalibrierung von beliebigen Farbwerten sein.

Die zur Auswertung verwendete Farbtafel (siehe Abbildung 8.1) ist ein kommerzielles Produkt, der Gretag Macbeth ColorChecker, der bereits 1976 von McCamy et al. [33] entwickelt wurde und sich seitdem, wie in Abschnitt 1.4 belegt wird, im Bereich der Videokamerakalibrierung durchgesetzt hat. Der Macbeth ColorChecker zeichnet sich durch die Verwendung von Farbpigmenten aus, die nicht reflektieren und besonders günstige photographische Eigenschaften aufweisen. Zudem decken die 24 Farbfelder einen weiten Bereich des Farbraumes ab und orientieren sich an häufig in der Natur vorkommenden Farben. Diese Farbtafel ist daher gut für die Bewertung der Kalibrierungsqualität geeignet.

Für die Auswertung wird der Macbeth ColorChecker mit einem Spektralphotometer ausgemessen. Die Bedingungen sind zu denen bei der Messung der Farbwerte des

Abbildung 8.1.: Der Gretag Macbeth ColorChecker.

Kalibriertableaus identisch. Die Werte dieser Messung sind im Anhang in Abschnitt B.2 aufgeführt, ebenso in dieser Tabelle zu finden sind die vom Hersteller vergebenen englischen Termini für die Benennung der Feldfarben.

Um eine Aussage über die Qualität der Kalibrierung unter einer bestimmten Beleuchtungsbedingung zu erhalten, wird das aufgenommene Bild des ColorCheckers kalibriert. Die Farbwerte dieser kalibrierten Farbtafel werden mit dem Algorithmus aus Abschnitt 4.1 extrahiert. Damit stehen die L*a*b*-Farbwerte der einzelnen Farbfelder zur Verfügung, die von der momentanen Kalibrierung erzeugt werden. Diese L*a*b*-Werte können nun mit den spektralphotometrisch gemessenen Sollwerten verglichen und die Farbdifferenz im CIE-L*a*b*-Farbraum berechnet werden. Daraus ergibt sich ein Maß für die Fehler der Kalibrierung an diesen Farborten, mit dem Aussagen über die farbmetrische Qualität der Kalibrierung unter dieser Beleuchtungsbedingung getroffen werden können. Über den visuellen Qualitätseindruck eines Betrachters des kalibrierten Bildes erlaubt dieses Qualitätsmaß nur bedingt eine Aussage.

8.1.1. Berechnung von Farbdifferenzen im CIE-L*a*b*-Farbraum

Für die Berechnung von Farbunterschieden im CIE-L*a*b*-Farbraum wurde von der CIE 1976 die Anwendung der unmodifizierten Euklidischen Metrik empfohlen. Da der CIE-L*a*b*-Raum so konstruiert wurde, daß die Farbabstände sich näherungsweise proportional zur menschlichen Wahrnehmung von Farbunterschieden verhalten, erschien es sinnvoll, die Fehlermessung auf diese Art durchzuführen. Mittlerweile haben weitere Untersuchungen ergeben, daß eine etwas abgewandelte Metrik besser mit der menschlichen Farbwahrnehmung korrelierte Ergebnisse liefert. Die folgende Metrik auf dem CIE-L*a*b*-Farbraum wurde 1994 von der CIE in [20] vorgeschlagen. Sie modelliert die für stark gesättigte Farben schlechtere menschliche Wahrnehmung für Farbdifferenzen.

Die Differenz ΔE^*_{94} zweier Farben $F_1 = (L^*_1, a^*_1, b^*_1)$ und $F_2 = (L^*_2, a^*_2, b^*_2)$ ist wie folgt definiert.

Zunächst werden C^*_1 und C^*_2 benötigt, mit $C^*_1 = \sqrt{a^{*2}_1 + b^{*2}_1}$ und $C^*_2 = \sqrt{a^{*2}_2 + b^{*2}_2}$. Mit diesen wird die Farbtondifferenz (Hue) ΔH^*_{ab} definiert durch

$$\begin{aligned} \Delta H^*_{ab} &= 2s \cdot \sqrt{C^*_1 \cdot C^*_2 - a^*_1 \cdot a^*_2 - b^*_1 \cdot b^*_2} \quad \text{mit} \\ s &= \begin{cases} -1 & \text{falls} \quad a^*_1 \cdot b^*_2 > a^*_2 \cdot b^*_1 \\ 1 & \text{sonst.} \end{cases} \end{aligned} \tag{8.1}$$

Anschließend läßt sich ΔE^*_{94} definieren durch

$$\Delta E^*_{94} = \left((L^*_1 - L^*_2)^2 + \left(\frac{C^*_1 - C^*_2}{1 + 0.045 * \sqrt{C^*_1 \cdot C^*_2}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*_{ab}}{1 + 0.015 * \sqrt{C^*_1 \cdot C^*_2}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \tag{8.2}$$

Mit diesem Abstandsmaß wird die farbmetrische Kalibrierung in dieser Arbeit bewertet. Um eine bessere Einordnung der Ergebnisse zu ermöglichen, ist zudem ein

Überblick über die Bewertung unterschiedlicher Ergebnisse für dieses Abstandsmaß nötig. Dieser erfolgt nach den Empfehlungen der CIE für eine gute Kalibrierung.

Die ΔE^*_{94} - Norm ist genau so konstruiert, daß die gerade eben sichtbare Farbdifferenz für ein geübtes Auge bei etwa $\Delta E^*_{94} = 1.0$ liegt. Eine sehr gute Kalibrierung hat Fehlerwerte von $\Delta E^*_{94} < 5$, der Bereich von $\Delta E^*_{94} < 10$ ist akzeptabel für eine Druckbildüberprüfung und ergibt ein optisch ansprechendes Bild. Bei Fehlern von $\Delta E^*_{94} > 10$ kann man zwar noch von einer bildverbessernden Maßnahme sprechen, aber nur noch bedingt von einer Farbkalibrierung.

Zusätzlich, um eine bessere Vergleichbarkeit mit älteren Daten herzustellen, soll kurz die ältere ΔE^*_{ab} - Norm erwähnt werden, die noch auf der völligen Proportionalität des L*a*b*-Raumes zum menschlichen visuellen System basiert und daher der Euklidischen Metrik entspricht. Es gelte

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L^*_1 - L^*_2)^2 + (a^*_1 - a^*_2)^2 + (b^*_1 - b^*_2)^2}\,. \tag{8.3}$$

8.1.2. Untersuchte Beleuchtungskategorien

Da die Messung der Kalibrierqualität unter variablen Beleuchtungsbedingungen stattfinden soll, wird zunächst eine Liste für die Auswertung verwendeten Bedingungen angegeben. Die Beleuchtungskategorien, für die im folgenden Untersuchungen durchgeführt werden, sind:

1. Fensterloser Innenraum mit heller Beleuchtung durch Neonröhren.
2. Fensterloser Innenraum mit dunkler, seitlich einfallender Beleuchtung durch Neonröhren derselben Beleuchtungsfarbe.
3. Innenraum mit Beleuchtung durch Neonröhren und zusätzlichem Tageslichteinfall durch ein Außenfenster.
4. Fensterloser Innenraum mit Beleuchtung durch einen Strahler mit rötlichem, dessen Beleuchtungsfarbe das Licht einer Glühlampe nachahmt.
5. Fensterloser Innenraum mit Beleuchtung durch einen bläulich leuchtenden Strahler, dessen Beleuchtungsfarbe das Tageslicht imitieren soll.
6. Tageslicht bei bewölktem Himmel.
   a) Tageslicht bei bewölktem Himmel mit Weißabgleich der Kamera.
7. Tageslicht bei Sonnenschein.
   a) Tageslicht bei Sonnenschein mit Weißabgleich der Kamera.

Mit diesen sieben Beleuchtungskategorien werden die folgenden Untersuchungen durchgeführt. Zunächst wird unter jeder der Bedingungen ein initiales Kameraprofil aufgenommen und es wird sofort darauf, möglichst ohne Änderung der Beleuchtung, der mittlere Fehler ΔE^*_{94} für alle Farbfelder des Macbeth ColorCheckers bestimmt. Damit läßt sich eine Aussage über die Qualität des Algorithmus zur Bestimmung eines initialen Kameraprofils treffen. Zudem untersucht, bei welchen Feldern die größten Abweichungen auftreten, d.h. für welche Farben die Kalibrierung die schlechteste Übereinstimmung liefert. Diese Untersuchung wird in Abschnitt 8.1.3 dargestellt.

Darauf aufbauend wird in Abschnitt 8.1.4 die Qualität der Anpassung der Kalibrierung an unterschiedliche Beleuchtungsbedingungen untersucht. Dazu wird nur ein einziges initiales Kameraprofil bei Innenraumbeleuchtung aufgenommen und es wird untersucht, wie groß die Fehler sind, die bei der automatischen Anpassung dieses Profils an die weiteren, oben aufgelisteten Beleuchtungskategorien auftreten. Dabei steigt der mittlere Fehler natürlich an, je stärker sich die untersuchte Lichtart von der Innenraumbeleuchtung unterscheidet.

Die Beleuchtungskategorien 6a. und 7a. stellen insofern eine Ausnahme dar, daß die CCD-Videokamera einen kamerainternen Weißabgleich besitzt. Mit diesem ist es möglich, die die Kameraantworten auf einen unbunten Körper abzugleichen, so daß die Kameraantwort für einen weißen Gegenstand bei sorgfältig eingestellter Kamerablende gleichmäßig bei 255 für alle drei Kanäle liegt. Für die Beleuchtungsbedingungen 1.-7. wird dieser Kameraweißabgleich nur ein einziges Mal auf die Beleuchtungsbedingung 1. eingestellt, also auf die Beleuchtung mit Neonröhren in einem ansonsten fensterlosen Innenraum.

Ist der Kameraweißabgleich auf das Licht von Neonröhren eingestellt, weicht bei Tageslicht die Kameraantwort auf unbunte Farben von dem Sollzustand $r = g = b$ so stark ab, daß eine sinnvolle Kalibrierung fast unmöglich wird. Ein weißes Objekt erzeugt bei Kameraweißabgleich auf Neonröhrenbeleuchtung eine Antwort von etwa $R = 75$, $G = 105$ und $B = 255$, wenn die Kamerablende so eingestellt wird, daß der blaue Farbkanal genau den Maximalwert von 255 liefert.

Damit wird durch die Kamerarezeption eine so starke Farbverfälschung realisiert, daß der Ausgleich schon wegen der erheblich stärkeren Quantisierung der Rotwerte zu einem schlechten Ergebnis führen muß. Da mit der festen Kameraeinstellung auf Neonlicht eine gute Kalibrierung bei Tageslicht fast unmöglich ist und besonders die automatische Anpassung des Innenraumprofils keine befriedigenden Ergebnisse liefert (s. Abbildung C.3 im Anhang), wird hier zusätzlich die Außenlichtkalibrierung nach einem erneuten Kameraweißabgleich auf das Tageslicht untersucht. Dies geschieht entgegen dem ursprünglich an die Arbeit gestellten Anspruch, die Kalibrierung allein mittels Software durchzuführen, ohne die Kameraparameter zu verändern.

8.1.3. Qualität des initialen Kameraprofils

Wie erwähnt wird in dieser ersten Untersuchung der Kalibrierqualität für jede der im vorigen Abschnitt aufgeführten Beleuchtungsbedingungen ein eigenständiges initiales Kameraprofil generiert, welches ohne jede Adaption zur Kalibrierung verwendet wird. Diese Anwendung des Profils geschieht möglichst ohne eine zwischenzeitliche Änderung der Beleuchtung. Damit soll die Qualität des initialen Kameraprofils unter den variierenden Beleuchtungsbedingungen geprüft werden. Tabelle 8.1 zeigt die Fehlerwerte dieser Untersuchung.

Dabei ist zu beachten, daß sowohl die Farbtafel zur Kalibrierung, als auch der Macbeth ColorChecker unter den meisten der untersuchten Beleuchtungsbedingungen erheblich ungleichmäßig ausgeleuchtet sind. Die Kalibrierung ist durch die Anwendung des Algorithmus zum Beleuchtungsausgleich über die auf dem Kalibriertableau verteilten Graufelder aus Abschnitt 4.2 als eine mittlere Kalibrierung über diese Lichtunterschiede anzusehen. Bei der Auswertung durch den Macbeth ColorChecker findet kein Beleuchtungsausgleich statt. Dadurch nimmt das Verfahren schon an dieser Stelle eine nicht zu vernachlässigende Beeinträchtigung der Kalibrierqualität in Kauf, die sich in den Fehlerwerten niederschlägt, aber in der Forderung nach Erprobung unter Realweltbedingungen begründet liegt.

Beleuchtungsbedingung	**Mittel** $\boldsymbol{\Delta E^*_{94}}$	**Stabw.** $\boldsymbol{\Delta E^*_{94}}$	**Max.** $\boldsymbol{\Delta E^*_{94}}$	**Farbfeld der max. Abweichung**
1. Neonlicht	6.80	2.64	11.53	24 (black)
2. dunkles Neonlicht	5.59	2.57	10.00	17 (magenta)
3. Neonlicht+Außenlicht	5.45	2.56	11.76	15 (red)
4. rötliches Licht	5.73	2.92	12.03	24 (black)
5. bläuliches Licht	5.88	2.89	12.75	19 (white)
6. Außenlicht bewölkt	6.83	2.43	10.42	19 (white)
6a. Außenlicht bewölkt mit Kameraweißabgleich	5.03	2.58	10.48	15 (red)
7. Außenlicht sonnig	8.45	3.56	19.48	21 (white)
7a. Außenlicht sonnig mit Kameraweißabgleich	4.67	2.49	9.97	20 (neutral 8)

Tabelle 8.1.: Die mittleren und maximalen Fehler der Kalibrierung mit einem speziell für die vorliegende Beleuchtungsbedingung generierten initialen Kameraprofil, ohne Anwendung der adaptiven Kalibrierung.

Liegt nun aber eine Änderung der Beleuchtung vor, ohne daß ein neues Profil generiert wird, liefert die fortgesetzte Kalibrierung mit dem ursprünglichen Kameraprofil ohne Adaption schlechte Ergebnisse. In Tabelle 8.2 werden die Fehlerwerte für eine Kalibrierung angegeben, die bei allen in der Tabelle aufgeführten Beleuchtungsbedingungen ein ausschließlich mit Neonröhrenbeleuchtung generiertes Innenraumprofil ohne Adaption verwendet.

Diese nicht adaptive Kalibrierung mit einem falschen initialen Kameraprofil liefert natürlich erwartungsgemäß sehr schlechte Ergebnisse. Die Tabelle 8.2 ist hier dargestellt, um deutlich zu machen, wie weit die nachträgliche Anpassung die Kalibrierung mit einem beliebigen initialen Kameraprofil verbessern kann. Das zur Erstellung dieser Tabelle verwendete Kameraprofil wird daher auch im nächsten Abschnitt als initiales Profil zur adaptiven Kalibrierung benutzt.

Die zu den Tabellen 8.1 und 8.2 identischen Auflistungen der Fehlerwerte für die ΔE^*_{ab} - Norm sind im Anhang in Abschnitt B.1 zu finden.

Beleuchtungsbedingung	**Mittel ΔE^*_{94}**	**Stabw. ΔE^*_{94}**	**Max. ΔE^*_{94}**	**Farbfeld der max. Abweichung**
1. Neonlicht	6.80	2.64	11.53	24 (black)
2. dunkles Neonlicht	18.80	2.28	24.99	19 (white)
3. Neonlicht+Außenlicht	8.96	4.51	16.33	20 (neutral 8)
4. rötliches Licht	13.73	4.89	21.03	5 (blue flower)
5. bläuliches Licht	23.64	6.77	36.44	19 (white)
6. Außenlicht bewölkt	21.66	6.69	33.96	19 (white)
6a. Außenlicht bewölkt mit Kameraweißabgleich	8.80	2.03	13.95	20 (neutral 8)
7. Außenlicht sonnig	21.73	8.12	35.93	2 (light skin)
7a. Außenlicht sonnig mit Kameraweißabgleich	9.61	3.01	16.32	20 (neutral 8)

Tabelle 8.2.: Die mittleren und maximalen Fehler für die Beleuchtungsbedingungen aus Abschnitt 8.1.2 bei Kalibrierung mit dem Innenraumprofil ohne automatische Anpassung.

8.1.4. Qualität der automatische Anpassung der Kalibrierung an variable Umgebungsbedingungen

In diesem Abschnitt wird eine zweite Möglichkeit untersucht, eine beliebige Beleuchtungsbedingung zu kalibrieren. Es wird ausschließlich ein einziges initiales Kameraprofil für die Kalibrierung unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen verwendet. Hierzu kommt das Profil zum Einsatz, daß schon für die Auswertung zur nicht adaptiven Kalibrierung mit einem Innenraumprofil im vorigen Abschnitt 8.1.3 verwendet worden ist, und das zum Vergleich in Tabelle 8.2 bereits ohne Anpassung auf die unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen angewandt wurde.

Die Kalibrierung auf unterschiedliche Beleuchtungssituationen erfolgt ausschließlich mit diesem Profil und dessen automatische Anpassung an die aktuelle Beleuchtung. Die Unterschiede, die in den Fehlerwerten zwischen der Auswertung in diesem Abschnitt (Tabelle 8.3) und der im vorigen bei Kalibrierung ausschließlich mit dem Innenraumprofil (Tabelle 8.2), werden einzig durch die Adaptivität der Kalibrierung erzeugt. Für die Anpassung wird der in Kapitel 6 erläuterte Automatismus angewandt, es wird keine Korrektur der Parameter „von Hand" vorgenommen.

Die Fehlerwerte, die unter diesen Bedingungen entstehen, sind in Tabelle 8.3 angegeben. Man erkennt deutlich, wie der mittlere Fehler mit einer stärkeren Abweichung der Beleuchtung vom Neonlicht kontinuierlich ansteigt, da das initiale Kameraprofil immer weniger der vorherrschenden Beleuchtung entspricht.

Wie für die nicht adaptive Kalibrierung ist wiederum im Anhang in Abschnitt B.1 eine zu Tabelle 8.3 identische Auflistung der Fehlerwerte unter Verwendung der ΔE^*_{ab} -Norm vorhanden.

Beleuchtungsbedingung	**Mittel** ΔE^*_{94}	**Stabw.** ΔE^*_{94}	**Max.** ΔE^*_{94}	**Farbfeld der max. Abweichung**
1. Neonlicht	6.80	2.64	11.53	24 (black)
2. dunkles Neonlicht	7.54	2.82	13.15	19 (white)
3. Neonlicht+Außenlicht	5.55	2.44	11.16	10 (purple)
4. rötliches Licht	5.47	2.52	11.60	24 (black)
5. bläuliches Licht	7.10	2.88	14.34	13 (blue)
6. Außenlicht bewölkt	10.24	3.56	16.80	19 (white)
6a. Außenlicht bewölkt mit Kameraweißabgleich	5.48	2.98	13.19	24 (black)
7. Außenlicht sonnig	16.79	4.64	23.32	2 (light skin)
7a. Außenlicht sonnig mit Kameraweißabgleich	6.87	3.46	15.93	24 (black)

Tabelle 8.3.: Die mittleren und maximalen Fehler der Kalibrierung mit automatischer Anpassung des Innenraumprofils.

8.1.5. Vergleich und Bewertung dieser beiden Herangehensweisen an die Videokamerakalibrierung

Legt man die in 8.1.1 angegebene Bewertung der Abstandswerte als Maßstab für die Kalibrierqualität an, dann bescheinigt diese den Kalibrierergebnissen aus Abschnitt 8.1.3, die ausschließlich mit einem optimal an die Beleuchtungsbedingungen angepaßten initialen Kameraprofil arbeiten, in fast allen Fällen eine gute Qualität. Eine Ausnahme bildet hierbei die Kalibrierung bei Außenlicht ohne erneuten Kameraweißabgleich. Die Gründe hierfür wurden bereits weiter oben in Abschnitt 8.1.2 erläutert. Der Algorithmus zur Erstellung des initialen Kameraprofils erzielt offensichtlich zufriedenstellende Ergebnisse.

Die Ergebnisse der Untersuchung aus Abschnitt 8.1.4, also die Anpassung des Innenraumprofils an die unterschiedlichen Beleuchtungskategorien, liefert erwartungsgemäß schlechtere Ergebnisse. Die Kalibrierung verschlechtert sich mit einer stärker werdenden Abweichung der Beleuchtung von der Lichtsituation, unter der das initiale Kameraprofil erstellt wird. So liefern dem Neonlicht ähnliche Beleuchtungsbedingungen z.T. sehr gute Resultate, während die Anpassung des Innenraumprofils an das Tageslicht nur mäßige Ergebnisse aufweist ($\Delta E^*_{94} > 10$). Die Beleuchtung kann trotzdem in einem weiten Bereich modifiziert werden, in dem eine annähernde Farbkonstanz erzeugt wird. Die Anpassung eines Innenraumprofils erzeugt für alle unter normalen Umständen eintretenden Innenraumbeleuchtungen, also bei Neonlicht, Glühlampenlicht und zusätzlich einfallendem Tageslicht, gute Ergebnisse mit einem durchschnittlichen Fehlerwert $\Delta E^*_{94} \approx 6$.

Die zwei unterschiedlichen Herangehensweisen an die Videokamerakalibrierung unterscheiden sich primär in ihrer Anwendung. Aus der Kalibrierung mit automatischer Anpassung an variable Umgebungsbedingungen kann ein Softwareprodukt hervorgehen, das ausschließlich die Anwendung eines vorgefertigten Kameraprofils realisiert.

Für jede Kamera würde dann ein feststehendes Kameraprofil beigefügt, das von der Software nur noch automatisch an die Umgebungsbeleuchtung angepaßt wird. In diesem Konzept würde die Kalibrierung wie beim Scanner ausschließlich werksseitig erfolgen und ein möglicher Kunde käme mit dem Farbtableau zur Kamerakalibrierung überhaupt nicht in Berührung.

Sollte ebenfalls das initiale Kameraprofil an spezielle Lichtbedingungen angepaßt werden, dann muß der Anwender ein Farbtableau besitzen und die Kalibrierung eigenständig durchführen können. Der Ablauf der hier implementierten Kalibrierung ist allerdings so einfach, daß dies kein großes Problem darstellen würde.

Dabei stellt sich natürlich die Frage, wann ein neues Profil erstellt werden sollte, und wann ein bestehendes genutzt werden kann. Diese Frage muß anhand der Ergebnisse aus den Tabellen 8.1 und 8.3 individuell nach den Anforderungen der jeweiligen Anwendung geklärt werden. Prinzipiell ist zu sagen, daß zumindest für Innenraum- und Außenlichtaufnahmen zwei unterschiedliche Profile verwendet werden sollten, da diese Beleuchtungsbedingungen zu stark voneinander abweichen, um mit demselben Kameraprofil eine gute Kalibrierung liefern zu können.

Ein Mittelweg zwischen diesen beiden Herangehensweisen wäre sicherlich, mehrere Kameraprofile unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen für jede Videokamera werksseitig zu erstellen und mit dem Softwareprodukt auszuliefern. So wäre z.B. ein Profil für Tageslicht und ein Profil für Innenraumbeleuchtung notwendig, zwischen denen der Anwender je nach Bedarf wählen kann.

Ob mit einer deutlichen Lichtänderung ebenfalls ein erneuter Kameraweißabgleich durchgeführt werden sollte, hängt ebenfalls vom Ziel der Anwendung ab. Es ist jedoch besonders beim Wechsel von Innenraumbeleuchtung zu Tageslicht zu empfehlen, da bei derart großen Beleuchtungsunterschieden die Videokamera ein fast nicht verwendbares Bild liefert.

Um sich von Kalibrierqualität, die in den Tabellen aus den Abschnitten 8.1.3 und 8.1.4 zahlenmäßig erfaßt ist, auch optisch ein Bild machen zu können, sind Bilder zu diesen Untersuchungen im Anhang in Abschnitt C.1 zu finden. Diese Bilder sind zudem in Abschnitt 8.2 ausführlich erläutert.

8.1.6. Kalibrierfehler anderer Verfahren

In diesem Abschnitt soll zusätzlich, um die erzielten Kalibrierergebnisse besser einordnen zu können, ein Vergleich mit den Fehlerwerten anderer Verfahren zur farbmetrischen Kalibrierung einer CCD-Kamera durchgeführt werden.

Ein ausführlicher Überblick über die Kalibrierfehler verschiedener anderer Verfahren wurde von Hubel et al. in [11] gegeben. Diese sind aber nur bedingt zum Vergleich mit den in dieser Arbeit angegebenen Fehlerwerten geeignet, da das Vorgehen zur Bestimmung der Fehlerwerte sich in den beiden Arbeiten erheblich unterscheidet. Das Kalibrierverfahren von Hubel beruht wiederum auf der Kalibrierung mit dem Macbeth ColorChecker. Es wird mittels Minimierung über die durch den ColorChecker gewonnenen Stützwerte eine 3×3 - Kalibriermatrix bestimmt, mit der die Kamera-RGB-Werte in CIE-L*a*b*-Werte umgerechnet werden.

Der Kalibrierfehler wird hierbei bestimmt, indem sofort nach der Berechnung der

Kalibriermatrix, mit der zur Kalibrierung verwendeten Abbildung des Macbeth ColorCheckers, die Fehlerwerte der einzelnen Farbfelder bestimmt und gemittelt werden. Damit wird die Kalibrierqualität nur an den Stellen ausgewertet, die zur Minimierung für die Matrixberechnung verwendet werden und daher natürlich optimal kalibriert sind. Zudem wird keine neue Aufnahme des ColorCheckers verwendet, die von der zur Kalibrierung verwendeten abweicht. Damit wird eine zusätzliche Fehlerquelle ausgeschlossen, da die Farbtafel bei der Aufnahme eines weiteren Bildes anders positioniert sein könnte und damit schon ein Beleuchtungsunterschied vorhanden wäre, der die gemessenen Farbwerte beeinflußt.

Mit dieser Meßmethode können also mit einer Kalibrierung gleicher Qualität erheblich bessere Fehlerwerte erzielt werden, als es mit dem für diese Arbeit angewandten Auswertungsverfahren möglich ist. Bei einem Vergleich der angegebenen Fehlerwerte sollte dieses beachtet werden.

Die geringsten Fehlerwerte nach der ΔE^*_{ab} - Norm zur Berechnung der Kalibrierfehler im CIE-L*a*b*-Farbraum, liefert bei Hubel et al. die Kalibrierung mit einer 3×3 - Matrix, die durch globale Minimierung in dieser Norm über alle Farbfelder des Macbeth ColorCheckers durchgeführt wird. Dieses Ergebnis folgt logisch aus dem Verfahren zur Bestimmung der Fehlerwerte. Die Untersuchung der Kalibrierfehler wird für verschiedene Beleuchtungsbedingungen durchgeführt, unter denen der jeweilige mittlere und maximale Fehler ΔE^*_{ab} über alle Felder des Macbeth ColorCheckers berechnet wird. Die mittleren Fehler für die unterschiedlichen Beleuchtungen liegen im Bereich $\Delta E^*_{ab} \in [3.2, \dots, 4.3]$, die maximalen Fehlerwerte bei $\Delta E^*_{ab} \in [5.9, \dots, 10.5]$.

In der Ausarbeitung von Hubel et al. werden zudem noch einige andere Verfahren untersucht, die bei der Minimierung zur Berechnung der Kalibriermatrix eine andere Gewichtung vornehmen. So werden z.B. nach einem Verfahren von Finlayson und Drew [12] die unbunten Farben stärker gewichtet und damit genauer kalibriert. Durch diese Ungleichgewichtung vergrößert sich natürlich der mittlere Fehler, optisch kann trotzdem ein besseres Resultat erzeugt werden. Für die anderen Auswertungen ergeben sich z.T. mittlere Fehlerwerte von bis zu $\Delta E^*_{ab} = 7.2$ und maximale Fehler von bis zu $\Delta E^*_{ab} = 20$. Dennoch werden von Testpersonen häufig diese vergleichsweise schlechten Kalibrierergebnisse denen mit genauer Kalibrierung vorgezogen.

Um überhaupt eine Vergleichbarkeit der Fehlerwerte von Hubel et al. mit der Kalibrierung in dieser Arbeit zu erreichen, wird eine ähnliche Untersuchung durchgeführt, die ebenfalls sofort nach der Kalibrierung den Kalibrierfehler für die Farbfelder der selbst erstellten Farbtafel berechnet. Für diese Untersuchung werden mittlere Fehlerwerte zwischen $\Delta E^*_{ab} \in [2.6, \dots, 3.3]$, sowie maximale Fehlerwerte zwischen $\Delta E^*_{ab} \in [7.5, \dots, 8.3]$ ermittelt. Bei der Berechnung der maximalen Fehlerwerte sind allerdings die besonders dunklen Farbfelder ausgenommen. Die Farbdifferenzierung der Videokamera in den dunklen Farbbereichen ist zu gering, um in diesen Bereichen eine genaue Kalibrierung liefern zu können, ohne erhebliche Farbabrisse generieren. Eine höhere Genauigkeit der Kalibrierung, die recht einfach durch eine Verringerung der Breite der Gaußfunktion aus Gleichung 5.6 in Abschnitt 5.2.2 mit einer Reduzierung des Parameters σ erreicht werden kann, hat ein erhebliches Farbrauschen in den dunklen Bildbereichen zur Folge. Daher wurde an dieser Stelle die optische Qualität des Bildes einer Verbesserung der Kalibrierstatistik vorgezogen. Aus diesem Grund treten regelmäßig für wenige der sehr dunklen Farbfelder Kalibrierfehler von bis zu $\Delta E^*_{ab} = 20$ auf.

Im Vergleich zur Matrixkalibrierung nach Hubel et al. wird also, abgesehen von den dunklen Farbfeldern, ein besseres Resultat für das initiale Kameraprofil erzielt.

Die für die vorgestellte Auswertung erzielten Fehlerwerte sind erwartungsgemäß geringer, als die weiter oben aufgeführten Kalibrierfehler des in dieser Arbeit vorgestellten Verfahrens, sagen aber wenig über die Qualität der Kalibrierung für beliebige Szenen aus. Diese wird durch die Untersuchungen der vorherigen Abschnitte besser wiedergegeben.

8.2. Optische Auswertung der Kalibrierqualität

Um den Zahlen, die im vorhergehenden Abschnitt angegeben wurden, eine visuelle Anschauung zu geben, soll in diesem Abschnitt eine optische Auswertung der Kalibrierqualität erfolgen. Dazu wird eine aus verschiedenfarbigen Objekten bestehende Szene unter den oben aufgeführten Beleuchtungsbedingungen sowohl kalibriert als auch unkalibriert dargestellt. Die Bilder, die in diesem Abschnitt angesprochen werden, befinden sich im Anhang im Abschnitt C.1.

Zur Ausgabe der Bilder wird eine Umrechnung der L*a*b*-Daten in den CMYK-Farbraum des Druckers vorgenommen, damit eine optisch ansprechende Bildrepräsentation entsteht, die vom Betrachter qualitativ bewertet werden kann. Trotz vorheriger Kalibrierung des Druckprozesses ändert sich die Farbwiedergabe gegenüber der Monitorrepräsentation, so daß durch die Bilder nur eine relative Aussage über die Qualität der Kamerakalibrierung getroffen werden kann.

Im einzelnen sind die Bildseiten im Anhang folgendermaßen aufgebaut:

- Auf der ersten Bildseite (S.109) befinden sich zwei Bilder die unter der Beleuchtungsbedingung 1, also in einem fensterlosen Innenraum mit einer Beleuchtung durch Neonröhren, aufgenommen sind. Das linke der beiden Bilder stellt die unkalibrierte Originalszene dar, das rechte ist mit dem initialen Kameraprofil für diese Beleuchtungsbedingung kalibriert.

- Auf jeder weiteren Seite (S.110-113) befinden sich sechs Bilder, jede Spalte mit drei Bildern repräsentiert eine der weiter oben in Abschnitt 8.1.2 genannten Beleuchtungsbedingungen.

- Das obere Bild jeder Spalte ist das Originalbild, wie es von der Kamera unter der entsprechenden Beleuchtungsbedingung aufgenommen wird. Es ist auf dem Drucker kalibriert ausgegeben.

- Auf dem mittleren Bild ist die Kalibrierung nur mit dem initialen Kameraprofil dargestellt. Diese Bilder repräsentieren die Fehlerwerte aus Abschnitt 8.1.3, Tabelle 8.1.

- Für das untere Bild wird die Kalibrierung mit einem automatisch angepaßten Innenraumprofil durchgeführt, die Fehlerwerte zu dieser Kalibrierung sind in

Abschnitt 8.1.4 in Tabelle 8.3 angegeben. Das verwendete Innenraumprofil ist identisch mit dem initialen Kameraprofil zur Kalibrierung der Innenraumbeleuchtung aus Abschnitt 8.1.3.

Damit werden alle in den vorhergehenden Abschnitten genannten Fehlerwerte mit Bildern belegt, so daß sich der Leser selbst einen Eindruck über die erreichte Kalibrierqualität machen kann.

8.3. Geschwindigkeit der Kalibrierung

Um die Untersuchungen zur Videoechtzeitfähigkeit des Kalibriersystems bewerten und einordnen zu können, muß kurz erläutert werden, welche Anforderungen eine Anwendung in *Videoechtzeit* an die zu erreichende Bildrate stellt.

Das menschliche Auge sieht eine Folge von Einzelbildern als sich kontinuierlich verändernde Szene, wenn eine ausreichend hohe Bildfrequenz erreicht wird. Dazu werden knapp 50 Bilder pro Sekunde benötigt. Ein Darstellungsmedium, das dieses leistet, stellt für das visuelle System des Menschen eine ruckfreie, kontinuierliche Bildsequenz dar. Bei Fernsehbildern, der gängigsten Darstellungsform für Bildsequenzen, wird diese hohe Bildfrequenz verringert, indem jedes Einzelbild in zwei Halbbildern versendet wird. Nacheinander werden die geraden und die ungeraden Bildzeilen jedes Bildes übertragen, so daß ein Bild in erst nach zwei Schritten komplett erneuert ist. Damit wird das Auge getäuscht und es werden mit nur 25 Vollbildern in jeder Sekunde 50 Bildänderungen erreicht und so eine Bildfrequenz von 50 Hz simuliert. Daher gilt eine Anwendung, die 25 Bilder in jeder Sekunde darstellen oder erzeugen kann, als Videoechtzeitfähig. Diese Ausführungen gelten für die in Europa standardisierte PAL-Fernsehnorm, in Amerika wird, basierend aus der dort verwendeten NTSC-Norm für die Fernsehdarstellung, von einem videoechtzeitfähigen System eine Bildrate von 30 Hz verlangt.

In diesen Zusammenhang sind die in Tabelle 8.4 aufgeführten Bildraten für die Darstellung des Videobildstroms einzuordnen. Dabei muß angemerkt werden, daß die verwendete Videokamera die in Europa gängige PAL-Videonorm verwendet und damit ebenfalls mit einer Frequenz von 50 Hz Halbbilder erzeugt. Höhere Bildfrequenzen deuten daher an, daß an dieser Stelle eine schnellere Verarbeitung der Bilddaten möglich ist, es ist allerdings nicht gewährleistet, daß beim erneuten Auslesen des Videospeichers der Framegrabberkarte dort ein neues Bild tatsächlich vorhanden ist. Die wirkliche Bildrate liegt hier bei 25 Hz, vorgegeben durch die Bildfrequenz der Kamera.

Die Tabelle gibt die Bildfrequenzwerte für zwei Bildformate an. Das ist zum einen das von der Kamera generierte $752*582$ Bildpunkte große Originalformat und zum anderen das durch einfache Unterabtastung erzeugte Kleinformat mit $376 * 291$ Bildpunkten.

Zudem wird die Bildrate mit unterschiedlichen Kalibrieroptionen gemessen. So wird in der Tabellenzeile „Ohne Kalibrierung" die Bildrate für eine völlig unbearbeitete Monitordarstellung des von der Kamera erzeugten Videobildstroms angegeben. Das Wort „Adaptiv" deutet an, daß eine automatische Profilanpassung während der Kalibrierung vorgenommen wird, und „mit Tetraederinterpolation” heißt, daß die in Abschnitt 5.3 erläuterte Tetraederinterpolation nach der eigentlichen Kalibrierung erfolgt.

Bei einer adaptiven Kalibrierung ist die angegebene Bildrate über die Zeit nicht völlig konstant, es kann bei Bildraten über etwa 10 Hz ein periodisches Ansteigen und Abfallen der Bildrate beobachtet werden. Das liegt in der Implementation der Adaptivität als im Hintergrund arbeitender Prozeß begründet.

Die Bildrate bei *Color Indexing* ist eine Vorwegnahme und wird erst in Abschnitt 8.5 interessant, in dem untersucht wird, wie sehr eine vorhergehende Kalibrierung dieses Verfahren zur Objektklassifizierung in Farbbildern robuster macht.

Versuchsbedingung	**Bildrate bei 752 ∗ 582 Pix.**	**Bildrate bei 376 ∗ 291 Pix.**
Darstellung des Videobildstroms ohne Kalibrierung	46.5 Bilder/s	169.7 Bilder/s
Profilanwendung nicht adaptiv ohne Tetraederinterpolation	18.2 Bilder/s	74.4 Bilder/s
Profilanwendung nicht adaptiv mit Tetraederinterpolation	5.0 Bilder/s	19.4 Bilder/s
Profilanwendung mit automatischer Anpassung und ohne Tetraederinterpolation	15.0 Bilder/s	68.3 Bilder/s
Profilanwendung mit automatischer Anpassung und mit Tetraederinterpolation	4.6 Bilder/s	18.0 Bilder/s
Profilanwendung mit automatischer Anpassung und *Color Indexing*	1.7 Bilder/s	7.3 Bilder/s

Tabelle 8.4.: Die Bildrate der Kalibrierung in Bildern pro Sekunde.

8.4. Beleuchtungsinvariante Extraktion von Hautfarbtönen aus Kamerabildern

Die Erkennung von Gesichtern ist ein zentrales Thema im maschinellen Sehen. In diesem Zusammenhang können Bildregionen, in denen Hautfarben verstärkt auftreten, einen guten Anhaltspunkt dafür liefern, wo die Anwendung eines aufwendigeren Gesichterkennungsalgorithmus lohnenswert erscheint. Die Eingrenzung von Hautfarben im unkalibrierten RGB-Raum ist jedoch problematisch, da diese unter unterschiedlicher Beleuchtung sehr stark variierende Farbwerte aufweisen können.

Die in der vorliegenden Arbeit implementierte Farbkalibrierung versucht, alle Farben so darzustellen, als wären sie von einem Standardlicht beleuchtet. Auf einem derart kalibrierten L*a*b*-Bild ist es daher erheblich einfacher, genaue Vorhersagen darüber zu treffen, in welchen Bildregionen Hautfarben auftreten, da die Farbwerte von Hautfarben unter dem standardisierten Normlicht eng begrenzt sind. Dadurch wird die

Eingrenzung von Hautfarbregionen auf einem kalibrierten L*a*b*-Bild im Vergleich zu einem unkalibrierten RGB-Bild stark erleichtert.

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, wie gut sich eine Objektfarbe, in diesem speziellen Fall Hautfarbe, unter variablen Beleuchtungsbedingungen im RGB- und im CIE-L*a*b*-Raum eingrenzen läßt. Zudem wird darauf eingegangen, wie robust das Verfahren auf beliebigen Szenen funktioniert, und welche Vorteile die vorherige Kalibrierung bringt.

8.4.1. Durchgeführte Untersuchungen

Für die Hautfarberkennung wird die Untersuchung auf vier Beleuchtungsbedingungen beschränkt, und zwar die in Abschnitt 8.1.3 aufgeführten Bedingungen 1, 2, 4 und 5 für einen fensterlosen Innenraum. Unter diesen vier Beleuchtungsbedingungen werden von mehreren Versuchspersonen mit heller Hautfarbe Bilder aufgenommen und kalibriert. Die Kalibrierung findet hierbei wiederum mit dem ebenfalls bereits weiter oben verwendeten, automatisch angepaßten Innenraumprofil statt. Damit ist die beleuchtungsinvariante Extraktion von Hautfarben für einen Anwender ohne zusätzlichen Aufwand durchführbar.

Sowohl in den unkalibrierten RGB-Bildern als auch in den kalibrierten L*a*b*-Bildern wird untersucht, in welchen Intervallen der Farbräume die Hautfarben liegen. Aus den Untersuchungen aller Bilder wird ein einziger Wertebereich für Hautfarben bestimmt, so daß etwa 80% der Hautfarben unter allen vorgegebenen Beleuchtungsbedingungen abgedeckt sind. Damit ist gewährleistet, daß alle in den Testaufnahmen vorkommenden Hautfarbregionen, also meist Gesichter und Hände, robust lokalisiert werden können. Die Größe des Hautfarbteilraumes des CIE-L*a*b- bzw. des Kamera-RGB-Raumes wird im folgenden bestimmt.

Um für diese Untersuchung eine Vergleichbarkeit von kalibrierten L*a*b*-Bildern und unkalibrierten RGB-Bildern herzustellen, wird eine Transformation des RGB-Raumes in einen anderen Farbraum vorgenommen, in dem die Farbkomponenten R' und B' unabhängig von der Farbhelligkeit sind und nur den Farbton wiedergeben. Die dritte Komponente G' dagegen gibt die Farbhelligkeit an. Dazu wird eine der Normierung des RGB-Raumes in Abschnitt 2.3.1, Gleichung 2.2 ähnliche Umrechnung angewandt. Es gelte

$$R' = 255 \cdot \frac{R}{R+G+B} \ , \quad G' = G \ , \quad B' = 255 \cdot \frac{B}{R+G+B} \ , \tag{8.4}$$

der daraus resultierende Farbraum wird im folgenden als RGB'-Farbraum bezeichnet.

Diese Konvertierung des RGB-Raumes in den RGB'-Raum ist sinnvoll, da die Hautfarben in einem Bild je nach Schattenwurf im Gesicht der zu erkennenden Person sehr variable Helligkeiten aufweisen. In den helligkeitsunabhängigen Farbkomponenten sind die Hautfarben dagegen relativ konstant. Daher wäre eine Eingrenzung von Hautfarben in einem quaderförmigen Farbbereich im RGB-Raum weitestgehend unmöglich und lieferte keine brauchbaren Ergebnisse. Um also eine Vergleichbarkeit der beiden Untersuchungen zu gewährleisten, wird die Umrechnung der RGB-Werte nach RGB' vorgenommen.

Zur Untersuchung, wie gut beide Verfahren die Trennung von Hautfarben und hautähnlichen Farben leisten, werden weitere Szenen aufgenommen, die sowohl Hautfarbe, als auch Objekte ähnlicher Färbung enthalten. Es wird untersucht, welche dieser Objekte in der RGB'- bzw. L*a*b*-Repräsentation als Hautfarben erkannt werden. Diese Untersuchung schließt ebenfalls die Verwendung der oben erwähnten, verschiedenen Beleuchtungssituationen ein. Mit den Ergebnissen dieser Tests kann dann eine Bewertung erfolgen, wie robust in der jeweiligen Bilddarstellung Hautfarben lokalisiert werden können.

8.4.2. Ergebnisse des Extraktionsverfahrens

Durch die Untersuchung der Testbilder wurden Farbbereiche ermittelt, die etwa 80% der Hautfarben abdecken. Acht der hierzu verwendeten Testbilder sind beispielhaft im Anhang in Abschnitt C.2 in Abbildung C.9 (S.117) dargestellt. Die Messung von Farbbereichen, die die Hautfarben in allen Testbildern zufriedenstellend einschließen, ergibt die folgenden Regionen im jeweiligen Farbraum.

CIE-L*a*b*-Farbraum:	RGB'-Farbraum:
$L^* \in [25, \ldots, 90]$	$R' \in [110, \ldots, 160]$
$a^* \in [7, \ldots, 27]$	$G' \in [20, \ldots, 200]$
$b^* \in [7, \ldots, 32]$	$B' \in [35, \ldots, 80]$

Dabei fällt auf, daß die Komponenten L^* bzw. G, die die Helligkeit repräsentieren, fast im gesamten Wertebereich variieren, während die Komponenten a^* und b^* bzw. R' und B', die den Farbton angeben, in einem relativ eng begrenzten Bereich liegen. Die Eingrenzung von Hautfarben wird also hauptsächlich durch deren Farbton realisiert.

Dabei sind die Wertebereiche für R' und B' erwartungsgemäß größer als die Bereiche von a^* und b^*, da im RGB'-Raum die Lichtänderung durch einen blauen und einen roten Strahler unverändert in die Bereichsbildung einfließt. So liegt eine mittlere Hautfarbe unter rotem Licht bei $(R', G', B') = (155, 100, 40)$ und unter blauem Licht bei $(R', G', B') = (115, 100, 75)$. Um unter beiden Beleuchtungsbedingungen eine robuste Extraktion von Bildbereichen mit Hautfarben zu gewährleisten, muß der Farbbereich diese Werte umspannen. Bei einer identischen Auswertung mit adaptiver Kalibrierung liegen die durchschnittlichen Farbwerte der Hautfarbe für rotes Licht mit $(L^*, a^*, b^*) = (150, 12, 12)$ und für blaues Licht mit $(L^*, a^*, b^*) = (150, 12, 22)$ dichter beieinander. Dadurch wird der Bereich, in dem Hautfarben in der L*a*b*-Repräsentation auftreten können, gegenüber der unkalibrierten Extraktion wesentlich eingeschränkt.

Im Anhang sind in Abschnitt C.2 einige Szenen dargestellt, auf die beide Verfahren zur Hautfarbextraktion angewandt werden. In den Abbildungen C.6, C.7 und C.8 sind sowohl die Originalbilder, als auch die Ergebnisse der Hautfarbmarkierung dargestellt. Als Hautfarben erkannte Bildpunkte werden rot markiert, Bereiche in denen mehr als 50% der Bildpunkte als Hautfarben klassifiziert werden, sind mit einem grünen Rahmen versehen, um die möglicherweise für eine Gesichterkennung interessanten Bildbereiche aufzuzeigen.

Im einzelnen sind die Abbildungen C.6-C.8 im Anhang folgendermaßen aufgebaut:

- Auf der ersten Seite (S.114) des Abschnitts C.2 in Abbildung C.6 sind drei Bilder dargestellt, die unter der Beleuchtungsbedingung 1 aufgenommen sind, also in einem fensterlosen Innenraum mit Beleuchtung durch Neonröhren. Das obere Bild stellt die unkalibrierte Originalszene dar. Das untere linke Bild verdeutlicht die Hautfarbextraktion auf einem kalibrierten L*a*b*-Bild, unten rechts sind die im RGB'-Bild erkannten Hautfarben eingetragen.
- Auf den weiteren Seiten (S.115-116) in den Abbildungen C.7 und C.8 befinden sich jeweils sechs Bilder, jede Spalte mit drei Bildern repräsentiert eine Beleuchtungsbedingung.
- Das obere Bild jeder Spalte ist das Originalbild, wie es von der Kamera aufgenommen wird, ausgegeben auf einem kalibrierten Drucker.
- Auf dem mittleren Bild wurde die Hautfarbextraktion in der L*a*b*-Darstellung vorgenommen. Dargestellt ist die kalibrierte Szene, in die als Hautfarbe erkannte Bildpunkte rot eingetragen sind.
- Im unteren Bild wird die Hautfarbmarkierung auf dem unkalibrierten RGB'-Bild vorgenommen, die als Hautfarben erkannten Bildpunkte sind in das von der Kamera generierte Originalbild ebenfalls rot eingetragen.

Man erkennt, daß die Hautfarbextraktion durch vorherige Kalibrierung erwartungsgemäß an Genauigkeit gewinnt. Besonders deutlich wird dies in Abbildung C.8, unter Beleuchtung mit einem roten Strahler. Für diese Beleuchtungsbedingung versagt die unkalibrierte Untersuchung, fast das gesamte Bild liegt im Bereich der Hautfarben. Hier erzielt das Verfahren bei vorheriger Kalibrierung eindeutig bessere Ergebnisse. Auch in den übrigen Bildern erreicht die kalibrierte Eingrenzung der Hautfarben eine sichtbar höhere Genauigkeit.

Würde dieselbe Untersuchung bei konstanter Beleuchtung durchgeführt, wären die Ergebnisse der beiden Varianten deutlich ähnlicher und der Bereich der Hautfarben könnte auch bei unkalibrierter Extraktion genauer eingegrenzt werden. Durch den kleineren Hautfarb-Unterraum des RGB'-Farbraumes würde die Genauigkeit des Extraktionsverfahrens bei konstanter Beleuchtung auch ohne Kalibrierung erheblich verbessert. In diesem Fall würde das unkalibrierte Verfahren bei einer Beleuchtungsänderung allerdings völlig versagen. Der Vorteil einer vorherigen Kalibrierung liegt also in einer erhöhten Robustheit des Verfahrens gegenüber Beleuchtungsänderungen.

8.5. Objektklassifizierung mittels *Color Indexing*

Color Indexing ist eine elegante und einfache Methode mittels Histogrammvergleichen eine Objekterkennung in Farbbildern zu realisieren. Dieses Verfahren wurde 1991 von M.J. Swain und D.H. Ballard in [26] entwickelt, und seitdem von diversen Autoren modifiziert und weiterentwickelt [27], [28], [29], [30].

Schon Swain und Ballard selbst schlugen in ihrer Arbeit die zusätzliche Verwendung eines Farbkonstanzalgorithmus vor, da das ansonsten robuste Verfahren unter variierenden Lichtverhältnissen weitgehend versagt. Die Verwendung eines Algorithmus zur Farbkalibrierung wurde allerdings von anderen Autoren zumeist mit der Begründung verworfen, daß ein derartig komplexes Verfahren die Einfachheit und Eleganz des Algorithmus von Swain und Ballard zunichte mache. Mit den immer schneller werdenden Rechnern wird es jedoch zunehmend sinnvoll, auch die Möglichkeit der Farbkalibrierung in Betracht zu ziehen. Zudem bieten sich, als Beispiel für eine Anwendung des *Color Indexing* auf einem kontinuierlichen Videobildstrom, für ein mobiles Kamerasystem interessante Perspektiven, wenn dieses zusätzlich entscheiden kann, ob unterschiedliche bekannte Objekte in dem dargestellten Bild vorhanden sind.

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, wie gut die Ergebnisse der Objekterkennung mit dem Algorithmus von Swain und Ballard bei einer Anwendung auf farbmetrisch kalibrierte L*a*b*-Bilder sind. Diese Ergebnisse sollen mit einer Anwendung des Verfahrens auf unkalibrierten RGB-Bildern verglichen werden.

Dazu wird zunächst in Abschnitt 8.5.1 das Verfahren aus [26] erläutert und im folgenden Abschnitt einige Parameter des Verfahrens für die hier vorgestellte Anwendung spezifiziert. Danach werden in Abschnitt 8.5.3 die durchgeführten Untersuchungen erläutert und in Abschnitt 8.5.4 die Ergebnisse dieser Untersuchung angegeben.

8.5.1. *Color Indexing* nach Swain und Ballard

Das von Swain und Ballard als *Color Indexing* vorgestellte Verfahren geht über die einfache Erkennung von Objekten anhand von Modellen, die in einer Datenbank angegeben sind, hinaus. Hier soll allerdings nur das von ihnen als *Histogram Intersection* bezeichnete Verfahren erläutert und untersucht werden, da dies der Teil des *Color Indexing* ist, auf den sich die zuvor durchgeführte Farbkalibrierung ausschließlich auswirkt.

Die *Histogram Intersection* generiert ein Wahrscheinlichkeitsmaß dafür, ob ein in der Modelldatenbank vorhandener Gegenstand in einem beliebigen Bild vorhanden ist. Dazu werden zunächst die Histogramme der Bilder aus der Datenbank und das Histogramm des zu untersuchenden Bildes berechnet. Auf die Frage, wie diese Histogramme in der vorliegenden Arbeit gebildet werden, wird im folgenden Abschnitt 8.5.2 eingegangen.

Seien zunächst $B = (B_1, \ldots, B_n)$ das Histogramm des zu untersuchenden Kamerabildes und $M^o = (M_1^o, \ldots, M_n^o)$ mit $o \in [1, \ldots, m]$ die Histogramme der m Modellbilder in der Datenbank. Die *Histogram Intersection* ist dann

$$H(B, M^o) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \min(B_i, M_i^o)}{\sum_{i=1}^{n} M_i^o} \,. \tag{8.5}$$

Dieses Maß ist 1, wenn alle Farben der Bildpunkte des Modells im Bild vorkommen. Durch die Minimumbildung wird ausgeschlossen, daß eine Überrepräsentation einiger Farben im zu untersuchenden Bild sich zu stark auf H auswirkt. Im folgenden soll untersucht werden, welche Werte dieses Maß für die Erkennung verschiedener Objekte in Videoechtzeit bei gleichzeitiger Bildkalibrierung annimmt.

8.5.2. Die verwendete Versuchsumgebung

Um die Auswirkungen der Farbkalibrierung testen zu können, wird in dieser Arbeit die *Histogram Intersection* auf RGB-Bildern unverändert nach Swain und Ballard implementiert. Es sind allerdings, im Gegensatz zur Originaluntersuchung, zwei Bilddatenbanken vorhanden. Die erste enthält die Objektbilder unkalibriert in ihrer RGB-Repräsentation, in der zweiten sind die auf das Normlicht D50 kalibrierten L*a*b*-Repräsentationen derselben Objekte abgelegt. Damit ist es möglich, das Verfahren für identische Objekte kalibriert wie unkalibriert zu testen. So kann die Verbesserung der Objekterkennung durch Kalibrierung direkt gemessen und beurteilt werden.

Die Histogramme für die RGB-Auswertung werden wie in der Arbeit von Swain und Ballard über die Gegenfarbachsen gebildet, die 1982 durch Ballard et al. [31] entwickelt wurden. Diese sind definiert durch

$$\begin{aligned} rg &= r - g, \\ by &= 2b - r - g, \\ wb &= r + g + b. \end{aligned} \tag{8.6}$$

Die Gegenfarbachsen orientieren sich wie die L*a*b*-Daten an der menschlichen visuellen Wahrnehmung. Die Intensitätsachse (wb) soll gröber eingeteilt werden, da bei unterschiedlicher Beleuchtung die Bildhelligkeit am stärksten schwankt. Daher werden die rg- und die by-Achse auf 16 Werte, die wb-Achse auf 8Werte quantisiert. Mit dieser Quantisierung wird ein dreidimensionales Histogramm gebildet. Die Anzahl der Histogrammtöpfe ist $n = 2048$. Analog dazu werden die Histogramme der kalibrierten L*a*b*-Objektbilder generiert. Die Helligkeitsachse L* wird in 8 Abschnitte unterteilt, die Farbachsen a* und b* jeweils in 16.

Während der Bildaufnahme wird nun von jedem Kamerabild ein ebensolches Histogramm erstellt, das auf die im vorigen Abschnitt beschriebene Weise mit allen Histogrammen der Datenbankobjekte verglichen wird. Dabei wird festgestellt, ob ein kalibriertes oder ein unkalibriertes Bild dargestellt ist, um die korrekte Bilddatenbank zu wählen. Anschließend werden die Wahrscheinlichkeiten der *Histogram Intersection* $H(B, M^o)$ für jedes Objekthistogramm M^o der Datenbank mit dem Histogramm des aktuellen Kamerabildes B berechnet.

In den Modelldatenbanken sind jeweils die in Abbildung 8.2 dargestellten 7 Objekte enthalten. Es wurde bei der Auswahl der Objekte darauf geachtet, daß einige Farben gehäuft vorkommen, um Verwechslungen zu provozieren.

8.5.3. Durchgeführte Untersuchungen

Mit diesen beiden Datenbanken werden Untersuchungen zur Qualität des *Color Indexing* unter verschiedenen Lichtbedingungen durchgeführt. Dies sind die drei bereits in Abschnitt 8.1.2 erläuterten Beleuchtungskategorien 1, 4 und 5, also ein fensterloser Innenraum zum einen mit Neonröhren, zum anderen mit einem rötlichen bzw. bläulichen Strahler beleuchtet. Unter diesen Beleuchtungsbedingungen werden die Objekte

Abbildung 8.2.: Bilddatenbank für die Auswertungen zum *Color Indexing*. In der Reihenfolge des Auftretens werden die Objekte im Text bezeichnet mit: Dose, Limo, Selter, Whiskey, Milka, Tee, Zucker.

der Modelldatenbank im Sichtfeld der Kamera plaziert und aufgenommen. Anschließend wird die *Histogram Intersection* $H(B, M^o)$ für jedes Objekt o der Datenbank mit dem aktuellen Kamerabild berechnet. Dies geschieht während der Bildaufnahme, so daß mit einer Bildrate von 1,7 Hz die Werte für $H(B, M^o)$ aufgezeichnet werden. Die Objekte werden mehrmals für etwa 10 Sekunden vor der Kamera plaziert. Aus den so generierten $H(B, M^o)$ werden Mittelwerte für gleiche Objekte und Lichtbedingungen gebildet. Diese Untersuchung wird, wie im vorigen Abschnitt erläutert, sowohl unkalibriert im RGB-Raum durchgeführt, als auch auf den kalibrierten L*a*b*-Bildern. Die Kalibrierung für die Untersuchung auf den L*a*b*-Daten wird nur mit einem einzigen initialen Kameraprofil und automatischer Anpassung dieses Profils durchgeführt. Es wird wie bei der Untersuchung zur Hautfarbextraktion das Profil für einen mit Neonröhren beleuchteten Innenraum verwendet.

8.5.4. Ergebnisse der Untersuchungen

Die Ergebnisse der spezifizierten Untersuchungen sind beispielhaft für die drei Objekte *Limo*, *Milka* und *Selter* in Abbildung 8.3 dargestellt. In den Diagrammen sind die Wahrscheinlichkeitswerte $H(B, M^o)$ für die *Histogram Intersection* auf der y-Achse aufgetragen. Auf der x-Achse finden sich die Gegenstände mit deren Modellbild das aktuelle Kamerabild verglichen wurde. Die Datenpunkte sind die Ergebnisse dieser

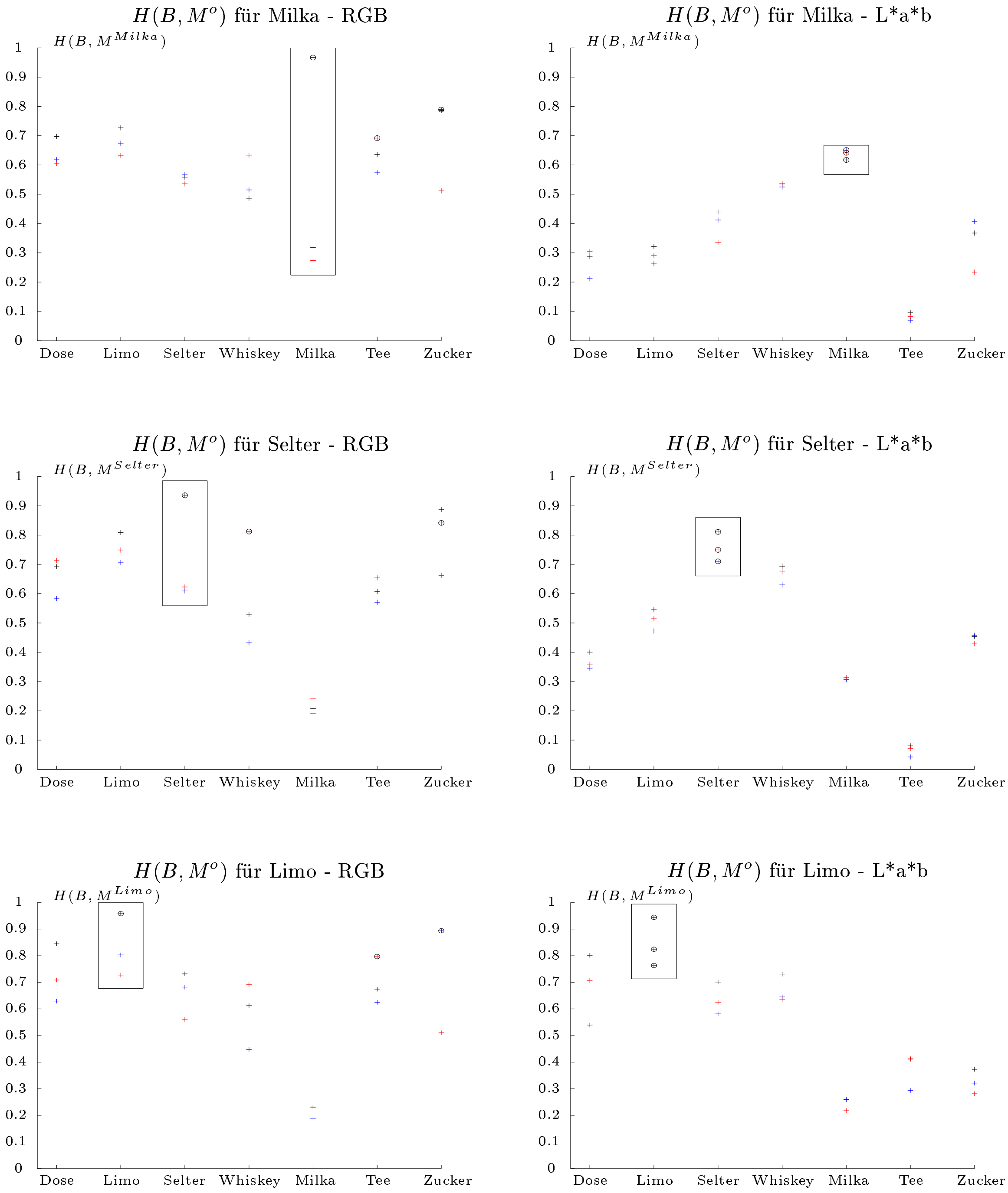

Abbildung 8.3.: Auswertung zum *Color Indexing*. Die angegebenen Objekte werden im jeweiligen Farbraum mit allen Bildern der Datenbank verglichen. Daraus werden die Wahrscheinlichkeitswerte $H(B, M^o)$ für die *Histogram Intersection* berechnet und in den Graphen eingetragen. Die maximalen Werte für $H(B, M^o)$ sind markiert. Die Datenpunkte für das im Kamerabild tatsächlich vorhandene Objekt sind zusätzlich eingerahmt.

Vergleiche. Die Farbe der Datenpunkte entspricht dabei der Beleuchtungsfarbe. Ein roter bzw. blauer Datenpunkt deutet die Beleuchtung mit einem roten bzw. blauen Strahler an, die schwarzen Datenpunkte stellen die Ergebnisse bei Beleuchtung mit Neonröhren dar. Zusätzlich sind die Datenpunkte eingerahmt, die dem im Kamerabild tatsächlich vorhandenen Gegenstand entsprechen. Daß die Objekterkennung für die unkalibrierte Variante des Verfahrens oft falsche Werte liefert, soll zusätzlich deutlich gemacht werden, indem die maximalen Wahrscheinlichkeitswerte für jede Beleuchtungsfarbe schwarz umrandet sind.

Für die Auswertung muß beachtet werden, daß auch die unkalibrierten RGB-Modelle unter Beleuchtung mit Neonröhren aufgenommen sind und sich daher eine sehr gute Wiedererkennungsrate bei Neonlicht ergibt. Für die anderen Beleuchtungsarten werden ohne Kalibrierung deutlich schlechtere Ergebnisse erzielt, die Objekte werden weitgehend falsch erkannt. Das einzige Objekt, das auch unter farbiger Beleuchtung korrekt erkannt wird, ist in der hier vorgestellten Untersuchung das Objekt „Tee".

In den Diagrammen aus Abbildung 8.3 erkennt man die Verschiebung des unkalibrierten Histogrammvergleichs in Richtung der Lichtfarbe. So wird bei blauer Beleuchtung jedes der drei dargestellten Objekte als „Zucker" erkannt, da dieser Gegenstand die meisten blau gefärbten Bildpunkte aufweist. Bei roter Beleuchtung werden weiße Flächen gelblich verfärbt, so daß Gegenstände mit weißen Flächen wie „Milka" und „Limo" als „Tee" erkannt werden, da dieses Objekt die meisten Gelbtöne enthält.

Bei der kalibrierten Bilderkennung sind die Ergebnisse erheblich konstanter, unterschiedliche Beleuchtungen haben nur geringe Auswirkungen auf die Matchingwahrscheinlichkeiten $H(B, M^o)$ (s. Abbildung 8.3). Trotz geringer Verschiebung der Wahrscheinlichkeiten für einzelne Objekte wurden alle Gegenstände der Bilddatenbank unter allen Beleuchtungsbedingungen in den kalibrierten Bildern korrekt erkannt.

An den Ergebnissen für diese Untersuchung kann man deutlich erkennen, wie sensibel der einfache *Color-Indexing*-Algorithmus gegenüber Änderungen der Beleuchtungsfarbe reagiert. Farbkalibrierung als Vorverarbeitung liefert deutlich bessere Ergebnisse mit demselben Verfahren. Durch die Kalibrierung mit einem zuvor erstellten, ausschließlich zu adaptierenden Kameraprofil wird der Kalibriervorgang zudem wesentlich beschleunigt. Damit ist die Berechnung der *Histogram Intersection* und insbesondere die Berechnung des Bildhistogramms der zeitaufwendigere der beiden Prozesse. Es wird daher das Argument anderer Autoren entkräftet, daß eine Farbkalibrierung die Eleganz dieses schnellen und einfachen Verfahrens zerstören würde. Aufbauend auf diese kurze Untersuchung erscheint eine Weiterführung dieses Ansatzes durchaus lohnenswert.

9. Zusammenfassung und Ausblick

In diesen Abschnitt soll die Arbeit abschließend zusammengefaßt und diskutiert werden. Zudem soll ein kurzer Ausblick auf mögliche Erweiterungen gegeben werden.

9.1. Zusammenfassung und Diskussion der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wurde ein System zur farbmetrischen Kalibrierung einer CCD-Videokamera unter Realweltbedingungen implementiert sowie die Videoechtzeitfähigkeit und Performance dieses Systems untersucht. Dabei wurde von den im Bereich des Color-Managements gesammelten Erfahrungen in der Farbkalibrierung profitiert. Es wurden die im Color-Management etablierten Standards verwendet und von den bereits in einer Implementierung vorliegenden Algorithmen zur Scannerkalibrierung ausgegangen.

Das in dieser Arbeit implementierte System hebt sich von den Untersuchungen anderer Autoren zur farbmetrischen Videokamerakalibrierung dadurch ab, daß eine primäre Anforderung die Kalibrierung unter Realweltbedingungen war. Das bedeutet, es wurde ein Kalibriersystem realisiert, das an keine festen oder speziell konstruierten Beleuchtungsbedingungen und Kalibrierumgebungen gebunden ist, sondern das möglichst bei jeder Beleuchtung und für jede dargestellte Szene gute und robuste Ergebnisse liefert. Eine weitere Anforderung an das System war die Videoechtzeitfähigkeit. Es sollte mit einem zeitgemäßen Rechnersystem ohne Spezialhardware eine akzeptable Bildrate bei der Anzeige der kalibrierten Bilder erreicht werden.

Um diese beiden Forderungen zu erfüllen, mußten Abstriche in der Qualität der implementierten Videokamerakalibrierung gegenüber der Scannerkalibrierung bzw. den Ergebnissen anderer Autoren gemacht werden. Daher wurde untersucht, wie gut die Ergebnisse einer Kalibrierung unter diesen erschwerten Bedingungen sein können und ob die Qualität der Ergebnisse ein solches System rechtfertigt. Diese Fragestellung kann schon an dieser Stelle eindeutig mit „Ja" beantwortet werden, denn auch trotz der im Vergleich zur Scannerkalibrierung schlechteren Ergebnisse ist die kalibrierte Videobildfolge der unkalibrierten in Farbtreue und Farbqualität wesentlich überlegen.

Um den oben skizzierten Erfordernissen gerecht zu werden, wurde zunächst der Ablauf der Scannerkalibrierung analysiert, und es wurden Überlegungen angestellt, welche Bereiche dieses Ablaufes für die Videokamerakalibrierung nutzbar sind. Daraufhin wurde ein in zwei separaten Schritten operierendes Verfahren entwickelt, dessen erster Schritt die Generierung eines initialen Kameraprofils ist. Dieses Kameraprofil orientiert sich im Aufbau an die für Geräteprofile vorgegebene Standardisierung des ICC und wird mit einem der Scannerkalibrierung ähnlichen Ablauf erzeugt. Der zweite

Schritt, die automatische Anpassung des initialen Kameraprofils an geänderte Umgebungsbedingungen, wird während der gesamten Laufzeit der Kalibrierung regelmäßig durchgeführt. Dabei wird die Anpassung des Profils ebenfalls im Rahmen des ICC-Standards vorgenommen.

Für die Erzeugung des initialen Kameraprofils benötigt das Kalibrierverfahren eine auf die Kalibrierung einer Farbvideokamera optimierte Farbtafel. Diese wird mittels des Canny-Operators und der Hough-Transformation skalierungs- und orientierungsinvariant aus einem Kamerabild extrahiert. Mit den so gewonnenen Daten wird das initiale Kameraprofil iterativ generiert und damit eine Kalibrierung für feste Lichtverhältnisse geschaffen.

Im adaptiven Teil der Kalibrierung wird parallel zur Anzeige des von der Kamera erzeugten Bildstroms die Anpassung an wechselnde Beleuchtungsbedingungen vorgenommen, ohne dabei wiederum mit dem Farbtableau arbeiten zu müssen. Dadurch wird eine annähernd beleuchtungsinvariante Darstellung der Kamerabilder erreicht, ohne daß ein möglicher Anwender des Kalibriersystems Vorkehrungen zur erneuten Kalibrierung treffen muß. Die automatische Profiländerung erfolgt mit einer Anpassung des Dynamikbereiches, um Helligkeitsunterschiede auszugleichen, und einer Verschiebung des Weißpunktes, die eine mögliche Veränderung der Beleuchtungsfärbung adaptiert.

Abschließend wurden diverse Untersuchungen zur Qualität des implementierten Verfahrens durchgeführt. Dabei waren die Gegenstände der Untersuchung zunächst die absolute Qualität der kalibrierten Bilder und die erreichte Bildrate. Diese erste Untersuchung wurde im Hinblick auf eine Anwendbarkeit des Verfahrens im Color-Management durchgeführt. Im zweiten Teil wurden konkrete Aufgabenstellungen aus dem maschinellen Sehen untersucht, und es war das Ziel dieser Untersuchungen, auch auf diesem Gebiet die möglichen Vorzüge einer farbmetrischen Kalibrierung der Kamera zu belegen.

Die Untersuchungen zur farbmetrischen Qualität zeigten eine weitreichende Verbesserung der Bildfarben. Erst bei starken Änderungen der Beleuchtungsfarbe lieferte die adaptive Kalibrierung schlechte Werte. Die Beleuchtung konnte in weiten Bereichen variiert werden, und es wurde immer noch ein mittlerer Farbfehler von $\Delta E^*_{94} < 8$ gemessen. Diese Kalibrierqualität ist für viele Anwendungen, auch im Color-Management, bereits ausreichend. Wurde die Kamera vor der Bildaufnahme direkt auf die vorherrschenden Beleuchtungsbedingungen kalibriert, konnten bessere Werte erzielt werden, so daß eine Qualitätssteigerung gegenüber der automatischen Anpassung der Kalibrierung möglich war. Im Vergleich mit anderen Publikationen zur farbmetrischen Kalibrierung einer Videokamera lieferte die hier vorgestellte Variante trotz der erheblich allgemeiner gehaltenen Umgebungsbedingungen vergleichbar gute Ergebnisse.

Als Aufgaben im maschinellen Sehen wurden zwei mögliche Anwendungen für die Farbkalibrierung eingehender untersucht. In einer ersten Untersuchung wurde versucht, Hautfarbtöne in kalibrierten L*a*b*-Bildern einzugrenzen, um eine ausschließlich auf Farbwerten basierende Hautfarberkennung beleuchtungsinvariant zu ermöglichen. In dieser Anwendung ergab die Kalibrierung deutliche Vorteile für die nachfolgende Erkennung. Die Repräsentation von Hautfarben konnte in den kalibrierten

L*a*b*-Bildern erheblich schärfer eingegrenzt werden als in deren unkalibrierter RGB-Repräsentation.

Weiterhin wurde untersucht, wie sich die Farbkalibrierung auf das von Swain und Ballard entwickelte *Color Indexing* [26] auswirkt. In dieser Untersuchung wurde wiederum eine verbesserte Robustheit der Objekterkennung gegenüber variablen Umgebungsbedingungen verifiziert. Es wurde durch die Kalibrierung möglich, Objekte aus einer einzigen Bilddatenbank unter mehreren unterschiedlich gefärbten Lichtarten korrekt zu erkennen.

Schon in diesen beiden Anwendungsbeispielen zeigt sich das Potential der Kalibrierung einer Farbvideokamera für das maschinelle Sehen, und es ist zu erwarten, daß weitere Anwendungen aus diesem Bereich durch eine systematische Farbkalibrierung erheblich verbessert würden.

9.2. Ausblick auf mögliche Erweiterungen

Da die Erzeugung des initialen Kameraprofils auf der im Rahmen des Color-Managements ausführlich untersuchten Scannerkalibrierung basiert, ist in diesem Bereich eine Verbesserung des Verfahrens nur eingeschränkt möglich. Mögliche Erweiterungen des Verfahrens liegen demzufolge besonders im Bereich der automatischen Anpassung dieses Profils an sich ändernde Beleuchtungsbedingungen.

Mit der zu erwartenden Zunahme der Rechnergeschwindigkeit in den nächsten Jahren werden an dieser Stelle auch für eine videoechtzeitfähige Anwendung aufwendigere als die in dieser Arbeit implementierten Algorithmen möglich. In diesem Zusammenhang wäre es zunächst sinnvoll den Algorithmus zum Auffinden des aktuellen Weißpunktes zu verbessern. Die von diesem Algorithmus vorgenommene Annahme, daß alle hellen Flächen des Bildes im Mittel grau ergeben, ist in realen Szenen nicht grundsätzlich zutreffend. Sie liefert besonders bei Szenen mit einem hellen, leicht gefärbten Hintergrund ungenaue Ergebnisse für die Vorhersage des Weißpunktes. An dieser Stelle wären allerdings noch weitere Untersuchungen nötig, da in der heutigen Literatur kein geeignetes Verfahren zur Lösung dieses Problems existiert.

Ein deutlicher Geschwindigkeitsvorteil würde z.B. mit einem Zwei-Prozessoren-Rechner erzielt. Da die Programmierung des Kalibrierverfahrens in zwei unabhängig voneinander ablaufenden Prozessen stattfindet, könnte die Berechnung von Beleuchtungsänderungen sehr einfach auf den zweiten Prozessor ausgelagert werden. Dadurch würden erhebliche Rechenkapazitäten zur komplexeren Berechnung des Weißpunktes im Kamerabild geschaffen.

Ebenso sind im Hinblick auf schnellere Rechnersysteme auch komplexere Anwendungen im Bereich des maschinellen Sehens denkbar, als in der Auswertung zu dieser Arbeit implementiert wurden. Schon das einfache Verfahren der *Histogram Intersection* zur Objektklassifizierung mit einer Bilddatenbank von zehn Bildern läßt bei laufender Kalibrierung die Bildrate an die Grenze sinken, bei der eine Anwendung noch als videoechtzeitfähig betitelt werden kann. Ein schnellerer Rechner ermöglicht weitreichendere bildverarbeitende Operationen wie Faltung oder Kantenextraktion in Videoechtzeit.

Eine weitere erhebliche Verbesserung des Verfahrens, die allerdings ebenfalls zusätzliche Hardware erfordert, wäre die Nutzung einer automatischen, vom Computer steuerbaren Kamerablende. Diese würde die Qualität des initialen Kameraprofils steigern, da das Kamerasignal automatisch auf Über- oder Unterbelichtung untersucht und auf diese reagiert werden könnte. Die Aufnahme des Farbtableaus zur Kalibrierung wäre also immer optimal belichtet. Desweiteren wäre es möglich, eine Helligkeitsänderung der Umgebungsbeleuchtung nicht durch die in dieser Arbeit implementierte Histogrammstreckung zu kompensieren, sondern durch Blendenregelung. Damit wäre wiederum die häufig auftretende Überbelichtung des CCD-Sensors ausgeschlossen und die Aufhellung von unterbelichteten Bildern erzeugte bessere Farbrepräsentation und eine geringere Quantisierung. Diese Erweiterung sollte die Anpassung an wechselnde Beleuchtungsintensitäten erheblich verbessern.

A. Anhang

A.1. Abkürzungsverzeichnis

Die wichtigsten in dieser Arbeit verwendeten Abkürzungen sind:

- CCD - Charge Coupled Device.

- CIE - Commission Internationale de l'Eclairage (Die internationale Beleuchtungskommission).

- ICC - International Color Consortium:

  > "The International Color Consortium was established in 1993 by eight industry vendors for the purpose of creating, promoting and encouraging the standardization and evolution of an open, vendor-neutral, cross-platform color management system architecture and components.", ICC, 1998.

- RGB - Farbraumbezeichnung für einen geräteabhängigen Farbraum auf Basis von roten, grünen und blauen Primärvalenzen.

- CIE-RGB - Farbraumbezeichnung für den von der CIE standardisierten RGB-Farbraum mit den Primärvalenzen Rot (700 nm), Grün (546,1 nm) und Blau (435,8 nm).

- CIE-XYZ - Farbraumbezeichnung für den von der CIE standardisierten XYZ-Farbraum mit den virtuellen Primärvalenzen X, Y und Z.

- CIE-L*a*b* - Farbraumbezeichnung für den von der CIE standardisierten, zur menschlichen Farbwahrnehmung proportionalen Farbraum.

- CMYK - Farbraumbezeichnung für den meistbenutzen Druckfarbraum: CMYK sind dabei die Anfangsbuchstaben der vier Druckfarben *Cyan*, *Magenta*, *Yellow* und *Black*.

- PCS - Profile Connection Space, bei ICC-Profilen die geräteunabhängigen Farbräume CIE-L*a*b* oder CIE-XYZ.

A.2. Die Firma Heidelberger Druckmaschinen AG - Division Digital

Diese Diplomarbeit ist aus einer Zusammenarbeit der Firma Heidelberger Druckmaschinen AG - Division Digital mit dem Lehrstuhl für kognitive Systeme an der Christian Albrechts Universität zu Kiel hervorgegangen. Es soll hier kurz die Entwicklung der Fa. Heidelberg angesprochen werden, um daran die langjährige Kompetenz auf dem Gebiet der Farbkalibrierung zu verdeutlichen und interessierten Lesern weitere Hintergrundinformationen zu bieten.

Die Division Digital der Heidelberg Druckmaschinen AG ist 1998 durch Übernahme der Linotype-Hell AG entstanden. Die Linotype-Hell AG selbst ist erst im Oktober 1990 aus der Fusion der Linotype AG und der Rudolf Hell GmbH, die zu diesem Zeitpunkt der Siemens-Gruppe angeschlossen war, hervorgegangen.

Die 1890 gegründete Mergenthaler Linotype Co. etablierte die erste Setzmaschine zum automatischen Setzen von Lettern zu Buch oder Zeitungsseiten. Seitdem wurde der Textsatz konsequent bis hin zum Laserbelichter für Negativplatten weiterentwickelt, die zur Ätzung von Druckplatten für den Offesetdruck benötigt werden. Seit 1985 wurde zudem die Integration von Bildern in Druckseiten realisiert, so daß 1987 die ersten Desktop-Publishing (DTP)-Geräte vorgestellt werden konnten. Der Schwerpunkt und damit auch die Spezialisierung des Unternehmens lag allerdings weiterhin in der Druckvorstufentechnik für den Textsatz.

Die 1929 als Tochtergesellschaft der Siemens AG gegründete Dr.-Ing. Rudolf-Hell KG stellte als erstes Produkt den Hellschreiber her, mit dessen Hilfe man erstmals Textinformationen über stark gestörte Nachrichtenkanäle übermitteln konnte. 1950 wurde dann ein Gerät zur Bildtelegrafie entwickelt, mit dem es möglich war, ebenfalls Bilder über diese Kanäle zu übertragen. Die Wende des Unternehmens hin zur Druckvorstufentechnik kam 1954, als der erste Klischograph vorgestellt wurde, der es ermöglichte, die übertragenen Bilder automatisch auf eine Druckplatte zu meißeln. Darauf folgte eine Reihe von Klischographen, die bereits ab 1959 das Einlesen von Bildern beherrschten, zunächst allerdings, um fast zeitgleich eine Druckplatte des gelesenen Bildes zu erzeugen. Schon in dieser frühen Stufe der Bildreproduktion kamen einfache Techniken für bildverbessernde Maßnahmen zur Anwendung, so konnte z.B. der Dichteumfang und der Gradationsverlauf des Bildes automatisch optimiert werden. Später wurden ebenfalls Chromagraphen entwickelt, die die eingelesen Bilder auf einen Negativfilm belichten konnten. Diese Technologie mündete 1992 in die Entwicklung eines Flachbettscanners für den professionellen Einsatz im Bereich der Druckvorstufentechnik.

Der Zusammenschluß der beiden Unternehmen sollte die Erfahrung in der Bild- und Textreproduktion zusammenführen und ein Unternehmen schaffen, daß die Integration von Text und Bild beherrscht und damit in der Lage ist, DTP als Druckvorstufentechnik zu betreiben. Die so entstandene Linotype-Hell AG konzentrierte sich in den folgenden Jahren auf eine konsequente Weiterentwicklung der Scanner und Filmbelichtertechnologie, sowie der Entwicklung von bildverarbeitender Software, die diese Geräte ansteuert und unterstützt. Auch die Gravursysteme für den Tiefdruck spielen bis heute eine nicht zu vernachlässigende Rolle in der Unternehmensstruktur. Im Jahr

1998 wurde das Unternehmen von der Heidelberg Gruppe übernommen, die durch diese Akquisition seine Kompetenz auf den Bereich der Druckvorstufe ausgeweitet hat und nun in der Lage ist, Komplettsysteme anzubieten, die das Drucken von der Vorstufe bis hin zur Ausgabe realisieren. Dabei wurde der Schwerpunkt der BU Prepress nur wenig verschoben und liegt immer noch in der Herstellung von Filmbelichtern und Scannern für die professionelle Anwendung.

Im Rahmen der Entwicklung der Scanner für den professionellen Anwendungsbereich spielte das Color-Management, also der korrekte Übergang von Farbinformationen von der Eingabe- zur Ausgabeseite, von Anfang an eine große Rolle. Folglich ist Heidelberg Digital, ehemals als Linotype-Hell AG, ein frühes Mitglied des International Color Consortiums (ICC), einer Unternehmensgemeinschaft, die internationale Standards für das Color-Management erarbeitet. In einer Scannersoftware wurde Color-Management ab 1991 umgesetzt, als die Personalcomputer eine Geschwindigkeit erreichten, die eine rechnergestützte Farbbildverarbeitung erstmals ermöglichte.

Die auf diesem Gebiet gesammelte Erfahrung mündete 1993 z.B. in einer Patentschrift [23] über ein Verfahren zur Scannerkalibrierung, welches sich als Grundlage für in diesem Unternehmen gefertigte Scannersoftware etablierte. Diese Color-Management-Software gilt in der Branche noch heute als führend. Dazu sollte angemerkt werden, daß auch die Laufzeitbibliothek, die in Microsoft-Windows ´98 und auch im neuen MS-Windows 2000 das Color-Management durchführt, bei Heidelberg Digital entwickelt wurde.

A.3. Verbesserung der Farben durch Verwendung von Color-Management

In der Abbildung A.1 ist ein von der Videokamera generiertes Farbbild zweimal ausgegeben. Dabei wurde nur auf der linken Seite ein Color-Management-Algorithmus zur Abbildung der Kamerafarben auf die Druckfarben verwendet. Das Bild auf der rechten Seite wurde ohne jede Farbumrechnung an den Drucker gesendet. Diese Abbildungen sollen verdeutlichen, welche Auswirkungen das Color-Management auf die Darstellung von Farbbildern hat und wie wichtig es im Druckbereich ist, eine gute Farbkalibrierung zu gewährleisten.

Abbildung A.1.: Die Bilder stellen dasselbe, von der Videokamera generierte Farbbild dar. Dabei wurde auf das linke Bild ein Color-Management-Algorithmus angewandt, während im rechten Bild die Kamerawerte unverändert ausgegeben wurden.

A.4. Die selbsterstellte Farbtafel

Auf der folgenden Seite ist ein herausnehmbares Original der selbsterstellten Farbtafel zur Videokamerakalibrierung zu finden.

Abbildung A.2.: Die selbsterstellte Farbtafel zum herausnehmen.

B. Tabellen

B.1. Die farbmetrische Auswertung mit der Farbabstandsnorm ΔE^*_{ab}

Um eine Vergleichbarkeit mit den Daten älterer Veröffentlichungen zu gewährleisten, werden an dieser Stelle die in den Abschnitten 8.1.3 und 8.1.4 aufgeführten Auswertungstabellen noch einmal unter Anwendung der ΔE^*_{ab} - Norm aufgeführt. Tabelle B.1 enthält die Werte für die in 8.1.3 durchgeführte Untersuchung, bei der ohne Adaption ausschließlich ein speziell erstelltes initiales Kameraprofil zur Kalibrierung angewandt wird. Die Tabelle B.2 enthält die Werte für die im selben Abschnitt angegebene Untersuchung, bei der die Kalibrierung mit einem nicht adaptierten Innenraumprofil durchgeführt wird, diese Kalibrierung liefert erwartungsgemäß sehr schlechte Ergebnisse. Die Auswertung für die adaptive Kalibrierung auf Basis des Innenraumprofils ist in Tabelle B.3 enthalten.

Beleuchtungsbedingung	**Mittel ΔE^*_{ab}**	**Stabw. ΔE^*_{ab}**	**Max. ΔE^*_{ab}**	**Farbfeld der max. Abweichung**
1. Neonlicht	8.97	2.97	13.96	8 (purplish blue)
2. dunkles Neonlicht	7.49	4.40	23.01	13 (blue)
3. Neonlicht+Außenlicht	7.32	3.79	16.16	15 (red)
4. rötliches Licht	7.68	2.99	12.53	24 (black)
5. bläuliches Licht	7.40	2.82	13.57	15 (red)
6. Außenlicht bewölkt	8.33	2.63	14.98	15 (red)
6a. Außenlicht bewölkt mit Kameraweißabgleich	7.55	4.10	18.01	7 (orange)
7. Außenlicht sonnig	10.31	4.79	25.02	19 (white)
7a. Außenlicht sonnig mit Kameraweißabgleich	6.71	3.30	15.97	14 (green)

Tabelle B.1.: Mittlere und maximale Fehler der Kalibrierung mit einem speziell für die vorliegende Beleuchtungsbedingung generierten initialen Kameraprofil und ohne Anwendung der adaptiven Kalibrierung (Entspricht Tabelle 8.1 für die ΔE^*_{94}-Norm).

Beleuchtungsbedingung	**Mittel ΔE^*_{ab}**	**Stabw. ΔE^*_{ab}**	**Max. ΔE^*_{ab}**	**Farbfeld der max. Abweichung**
1. Neonlicht	8.97	2.97	13.96	8 (purplish blue)
2. dunkles Neonlicht	19.75	2.40	24.97	19 (white)
3. Neonlicht+Außenlicht	11.74	3.90	17.24	8 (purplish blue)
4. rötliches Licht	20.98	7.36	36.65	16 (yellow)
5. bläuliches Licht	26.97	6.11	38.27	19 (white)
6. Außenlicht bewölkt	26.32	4.45	38.12	19 (white)
6a. Außenlicht bewölkt mit Kameraweißabgleich	9.54	1.91	13.85	(neutral 8)
7. Außenlicht sonnig	29.62	4.12	37.57	20 (neutral 8)
7a. Außenlicht sonnig mit Kameraweißabgleich	10.93	2.59	16.16	20 (neutral 8)

Tabelle B.2.: Mittlere und maximale Fehler bei Kalibrierung mit dem Innenraumprofil ohne automatische Anpassung dieses Profils an die variierenden Lichtbedingungen (Entspricht Tabelle 8.2 für die ΔE^*_{94}-Norm).

Beleuchtungsbedingung	**Mittel ΔE^*_{ab}**	**Stabw. ΔE^*_{ab}**	**Max. ΔE^*_{ab}**	**Farbfeld der max. Abweichung**
1. Neonlicht	8.97	2.97	13.96	8 (purplish blue)
2. dunkles Neonlicht	9.10	3.23	16.01	24 (black)
3. Neonlicht+Außenlicht	7.58	3.21	15.60	15 (red)
4. rötliches Licht	7.27	3.43	14.29	16 (yellow)
5. bläuliches Licht	10.64	4.24	17.84	13 (blue)
6. Außenlicht bewölkt	14.26	5.67	24.04	12 (orange yellow)
6a. Außenlicht bewölkt mit Kameraweißabgleich	7.30	2.38	13.33	23 (black)
7. Außenlicht sonnig	20.14	6.38	30.93	12 (orange yellow)
7a. Außenlicht sonnig mit Kameraweißabgleich	8.41	2.77	16.24	23 (black)

Tabelle B.3.: Mittlere und maximale Fehler der Kalibrierung durch automatische Anpassung des Innenraumprofils (Entspricht Tabelle 8.3 für die ΔE^*_{94}-Norm).

B.2. Die Farbwerte des Macbeth ColorCheckers

In Tabelle B.4 sind die spektralphotometrisch gemessenen Farbwerte des Macbeth ColorCheckers aufgelistet. Die Farbfelder sind in dieser Tabelle von links oben bis rechts unten zeilenweise numeriert. Zusätzlich sind in der Spalte „Bezeichnung" die vom Hersteller vorgegebenen englischen Farbfeldbezeichnungen aufgeführt.

Nr.	Bezeichnung	X	Y	Z	L	a	b
1	dark skin	11.814	10.146	4.878	38.108	15.154	15.358
2	light skin	38.67	34.798	19.046	65.588	17.1	17.956
3	blue sky	17.1	18.452	26.316	50.034	-3.678	-22.822
4	foliage	10.212	12.604	5.026	42.154	-14.09	21.57
5	blue flower	24.626	23.48	34.052	55.558	8.824	-25.562
6	bluish green	30.874	42.212	34.396	71.016	-32.954	0.59
7	orange	40.172	30.888	4.358	62.414	35.508	60.132
8	purplish blue	11.448	10.622	27.508	38.938	8.992	-43.99
9	moderate red	29.462	19.518	10.166	51.288	46.786	16.468
10	purple	8.04	5.89	10.556	29.13	23.918	-22.988
11	yellow green	34.766	43.736	7.918	72.052	-23.616	60.224
12	orange yellow	48.004	42.8	6.008	71.42	19.524	67.192
13	blue	6.778	5.364	20.332	27.744	17.826	-49.998
14	green	13.546	21.564	6.788	53.56	-39.866	32.918
15	red	21.362	11.99	3.502	41.2	56.03	28.84
16	yellow	58.308	58.96	7.346	81.264	3.622	78.378
17	magenta	29.454	18.946	22.21	50.62	49.622	-14.304
18	cyan	12.44	17.768	28.06	49.214	-28.406	-27.198
19	white	84.236	87.834	70.706	95.09	-0.794	1.524
20	neutral 8	53.682	55.9	45.484	79.554	-0.492	0.726
21	neutral 6.5	32.844	34.002	28.016	64.962	0.25	0.038
22	neutral 5	18.14	18.978	15.484	50.658	-0.806	0.408
23	neutral 3.5	8.03	8.426	6.918	34.858	-0.826	0.132
24	black	2.868	2.97	2.424	19.916	0.092	0.218

Tabelle B.4.: Die spektralphotometrisch gemessenen Farbwerte des Macbeth ColorCheckers.

B.3. Die Farbwerte der eigenen Farbtafel

In Tabelle B.5 sind spektralphotometrisch gemessenen Farbwerte der selbst erstellten Farbtafel angegeben. Die Zuordnung der hier verwendeten Zeilen- und Spaltenkoordinaten der Farbtafel zu den Farbfeldern ist in Abbildung 3.1, Abschnitt 3.2 dargestellt.

Feld	X	Y	Z	L	a	b	Feld	X	Y	Z	L	a	b
A1	43.50	45.47	39.96	73.20	-0.97	-3.30	F9	10.49	16.89	36.66	48.13	-37.70	-42.09
A2	5.48	5.73	18.94	28.73	-0.54	-45.37	F10	7.17	4.35	6.79	24.80	34.43	-16.68
A3	36.57	33.14	23.14	64.27	15.96	7.45	F11	20.87	28.58	43.30	60.41	-29.13	-29.62
A4	12.39	10.65	20.92	38.99	15.30	-31.80	F12	43.89	45.86	40.18	73.45	-0.92	-3.15
A5	22.59	21.05	12.84	53.00	10.85	11.38	F13	34.36	39.79	45.98	69.32	-13.24	-17.51
A6	21.91	16.20	21.54	47.23	32.62	-18.84	F14	18.23	19.11	17.58	50.82	-0.99	-4.27
A7	11.21	22.90	4.16	54.97	-61.84	48.44	F15	43.82	45.79	40.12	73.41	-0.91	-3.15
A8	43.53	45.50	39.92	73.22	-0.94	-3.22	G1	14.28	8.23	6.90	34.46	47.06	-0.49
A9	8.06	10.58	2.46	38.87	-17.89	32.58	G2	10.37	10.87	10.27	39.36	-0.81	-4.44
A10	34.95	23.38	21.66	55.46	48.55	-4.89	G3	24.85	13.61	6.88	43.66	61.06	15.46
A11	6.02	4.05	1.03	23.85	26.63	22.34	G4	51.59	52.38	47.75	77.50	2.93	-5.50
A12	49.20	30.96	21.90	62.48	61.36	6.73	G5	39.09	20.56	6.90	52.47	74.97	30.57
A13	12.76	7.77	1.14	33.51	41.44	37.35	G6	70.38	65.32	48.49	84.65	16.42	5.96
A14	7.54	10.85	24.88	39.32	-24.62	-38.75	G7	3.92	5.00	11.01	26.74	-12.27	-28.55
A15	44.04	46.01	40.37	73.55	-0.90	-3.23	G8	12.22	21.34	41.73	53.32	-47.58	-39.87
B1	15.90	18.61	28.23	50.22	-11.23	-25.74	G9	10.77	10.08	11.92	37.99	8.12	-11.88
B2	83.13	86.67	72.97	94.60	-0.77	-1.33	G10	23.77	36.11	50.04	66.61	-42.48	-26.91
B3	27.22	26.45	29.31	58.46	7.10	-13.31	G11	20.22	15.73	12.00	46.62	27.18	2.77
B4	43.60	45.59	40.06	73.28	-0.98	-3.30	G12	39.10	51.07	53.86	76.72	-29.51	-13.68
B5	42.15	35.83	30.01	66.39	24.39	-0.76	G13	32.94	22.84	12.13	54.90	43.96	16.68
B6	23.67	13.39	1.04	43.35	57.29	55.74	G14	25.80	27.03	24.41	59.01	-1.05	-3.98
B7	58.09	44.93	29.98	72.84	39.42	10.43	G15	47.08	30.38	11.91	61.98	57.63	29.51
B8	39.06	20.88	1.05	52.82	73.38	71.97	H1	58.53	67.72	56.48	85.87	-15.66	-0.67
B9	9.47	16.24	30.81	47.29	-42.06	-34.93	H2	4.73	4.94	4.88	26.58	-0.46	-4.53
B10	2.24	4.10	1.99	24.00	-29.79	11.11	H3	80.14	84.74	57.92	93.77	-2.99	11.47
B11	19.72	27.88	35.57	59.78	-32.02	-20.46	H4	5.44	9.58	13.48	37.07	-37.03	-17.84
B12	43.66	45.63	40.03	73.30	-0.92	-3.22	H5	50.27	42.76	26.08	71.39	25.78	14.40
B13	32.72	38.73	37.31	68.56	-15.66	-7.76	H6	43.76	45.74	40.19	73.38	-0.94	-3.30
B14	0.51	0.51	0.48	4.61	0.72	-1.08	H7	34.88	33.37	21.23	64.46	9.49	11.48
B15	50.13	51.74	38.46	77.13	0.70	5.45	H8	13.51	17.19	14.76	48.50	-18.32	-1.51
C1	8.48	8.86	2.08	35.72	-0.54	30.48	H9	17.74	16.35	7.33	47.43	11.00	20.10
C2	58.23	60.79	52.38	82.26	-0.87	-2.51	H10	43.67	45.64	40.05	73.31	-0.94	-3.23
C3	16.71	13.99	2.08	44.22	19.22	45.17	H11	38.23	32.17	19.67	63.48	24.80	12.99
C4	68.81	64.66	38.99	84.31	14.52	17.12	H12	24.59	25.15	15.27	57.22	1.51	12.24
C5	29.80	21.42	2.10	53.40	38.94	60.85	H13	14.39	14.32	9.48	44.69	3.65	7.40
C6	10.88	20.23	34.43	52.10	-51.87	-32.07	H14	43.23	44.46	40.32	72.54	1.11	-4.91
C7	46.60	30.26	2.15	61.88	56.77	75.01	H15	6.59	6.10	24.49	29.66	7.64	-54.71
C8	22.37	35.05	40.31	65.79	-45.26	-16.54	I1	39.00	34.27	15.58	65.17	19.95	25.19
C9	3.23	7.46	2.68	32.83	-49.31	20.33	I2	1.63	1.66	1.71	13.58	0.90	-3.94
C10	37.44	49.74	42.80	75.91	-31.32	-2.27	I3	54.70	43.12	15.27	71.63	36.22	37.10
C11	10.48	14.34	2.79	44.72	-23.07	39.96	I4	13.34	10.76	27.87	39.17	20.88	-44.21
C12	56.77	66.55	44.25	85.27	-17.39	12.08	I5	6.98	14.34	16.29	44.71	-53.31	-11.81
C13	20.14	21.51	2.97	53.50	-2.87	53.74	I6	22.79	16.19	28.83	47.22	36.72	-31.90
C14	61.66	1.69	1.73	13.77	0.91	-3.78	I7	16.58	25.33	17.94	57.40	-38.30	6.25
C15	34.30	30.49	2.99	62.07	17.83	68.40	I8	36.12	23.52	29.58	55.60	51.86	-18.67
D1	78.00	83.36	44.86	93.17	-4.62	24.96	I9	29.37	36.24	18.60	66.70	-20.00	20.84
D2	43.74	44.76	40.54	72.74	1.75	-4.86	I10	50.79	31.35	30.08	62.80	64.19	-7.05
D3	3.46	1.92	12.52	15.09	30.93	-53.10	I11	46.02	48.79	18.69	75.32	-2.83	35.51
D4	53.35	41.43	3.07	70.48	37.79	82.33	I12	8.99	11.58	33.40	40.54	-16.99	-50.50
D5	8.32	4.53	13.71	25.35	42.78	-38.68	I13	64.99	61.74	18.65	82.77	12.71	48.44
D6	43.64	45.62	40.06	73.30	-0.97	-3.26	I14	58.10	60.63	52.13	82.18	-0.82	-2.38
D7	15.37	8.32	14.02	34.64	52.91	-23.50	I15	8.11	17.81	17.73	49.27	-62.25	-7.29
D8	4.43	11.74	3.37	40.80	-65.66	29.04	J1	17.51	19.13	39.17	50.84	-4.91	-40.81
D9	26.44	14.05	14.37	44.30	64.98	-7.75	J2	0.27	0.27	0.26	2.41	0.54	-0.77
D10	43.75	45.73	40.10	73.37	-0.95	-3.20	J3	28.83	26.83	41.27	58.81	11.91	-29.81
D11	41.24	21.30	14.40	53.28	78.15	7.66	J4	43.66	45.63	40.07	73.30	-0.93	-3.27
D12	13.00	21.35	3.65	53.33	-42.46	48.76	J5	44.13	36.42	43.06	66.84	28.30	-18.22
D13	5.84	5.74	21.74	28.74	3.60	-51.11	J6	18.73	31.56	19.98	62.98	-50.79	11.47
D14	4.83	5.05	4.96	26.88	-0.47	-4.42	J7	60.14	45.45	43.58	73.19	42.84	-7.93
D15	12.85	10.71	24.45	39.08	18.02	-38.41	J8	33.19	45.86	20.80	73.46	-35.10	27.87
E1	24.22	31.33	3.91	62.79	-24.08	63.44	J9	11.73	17.89	42.78	49.36	-33.96	-48.02
E2	25.64	26.88	24.32	58.86	-1.11	-4.05	J10	51.64	62.34	20.95	83.09	-21.02	44.17
E3	41.03	43.93	4.09	72.18	-3.95	78.57	J11	22.19	29.36	51.47	61.10	-25.88	-38.00
E4	22.48	16.22	25.32	47.26	35.11	-25.87	J12	43.77	45.74	40.04	73.38	-0.91	-3.11
E5	62.05	57.84	4.21	80.65	15.14	92.44	J13	35.48	40.20	55.18	69.61	-10.67	-27.33
E6	35.52	23.39	25.77	55.48	50.38	-12.49	J14	82.53	86.03	72.22	94.32	-0.74	-1.15
E7	5.43	15.23	3.87	45.94	-75.28	34.69	J15	53.05	53.07	57.89	77.91	4.97	-15.84
E8	50.06	31.16	26.00	62.65	62.93	-0.54	K1	43.84	45.80	40.23	73.42	-0.89	-3.29
E9	15.13	27.53	4.30	59.46	-55.52	55.39	K2	71.85	65.54	59.23	84.76	19.05	-5.39
E10	8.15	11.09	29.35	39.73	-20.74	-45.64	K3	73.46	79.55	20.82	91.48	-6.54	58.90
E11	27.71	40.45	4.67	69.79	-39.79	71.11	K4	13.68	22.52	49.22	54.58	-43.42	-46.72
E12	16.83	19.08	33.93	50.78	-8.34	-33.63	K5	3.24	1.96	10.87	15.27	26.53	-47.89
E13	46.76	57.10	5.00	80.24	-21.93	87.33	K6	25.57	37.39	60.75	67.57	-38.94	-36.55
E14	10.40	10.90	10.28	39.41	-0.79	-4.37	K7	7.97	4.50	11.73	25.27	39.89	-33.24
E15	71.43	75.98	5.19	89.85	-3.77	102.92	K8	44.06	46.03	40.30	73.56	-0.89	-3.13
F1	43.91	45.89	40.31	73.47	-0.93	-3.30	K9	14.84	8.20	11.92	34.39	50.83	-18.11
F2	18.48	19.37	17.83	51.12	-1.00	-4.32	K10	40.82	52.08	66.31	77.33	-26.79	-25.08
F3	28.17	26.86	35.54	58.84	9.23	-22.05	K11	26.11	14.07	12.29	44.33	63.52	-2.02
F4	43.98	45.97	40.34	73.53	-0.96	-3.24	K12	60.77	69.01	69.88	86.51	-13.09	-12.54
F5	43.04	36.14	36.61	66.63	26.00	-10.11	K13	40.11	20.90	12.21	52.84	76.57	12.86
F6	2.12	1.42	6.21	12.08	19.09	-36.06	K14	35.64	33.23	17.47	64.34	12.59	19.28
F7	59.00	45.19	36.61	73.02	40.84	0.90	K15	43.63	45.57	39.92	73.27	-0.86	-3.13
F8	43.80	45.77	40.12	73.40	-0.91	-3.18							

Tabelle B.5.: Die Farbwerte der Farbtafel aus Abschnitt 3.2.

C. Kamerabilder

C.1. Bilder zur optischen Beurteilung der Kalibrierqualität

Auf den folgenden Seiten befinden sich in den Abbildungen C.1 bis C.5 Farbbilder, die eine aus unterschiedlichen Objekten bestehende Szene kalibriert wie auch unkalibriert unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen darstellen. Diese Bilder belegen die optische Qualität der Kalibrierung und wurden in Abschnitt 8.2 detailliert beschrieben.

Abbildung C.1.:

- *Beleuchtungsbedingung:* 1. Fensterloser Innenraum mit heller Beleuchtung durch Neonröhren.
- *Links:* Unkalibriertes Kamerabild.
- *Rechts:* Kalibrierung mit optimalem initialen Kameraprofil.

Abbildung C.2.:

- *Beleuchtung links:* 2. Fensterloser Innenraum mit dunkler Beleuchtung durch Neonröhren.
- *Beleuchtung rechts:* 3. Innenraum mit Beleuchtung durch Neonröhren und zusätzlichem Lichteinfall durch ein Außenfenster.
- *Oben:* Unkalibriertes Kamerabild.
- *Mitte:* Kalibrierung mit optimalem initialen Kameraprofil.
- *Unten:* Kalibrierung mit automatisch angepaßtem Innenraumprofil.

Abbildung C.3.:

- *Beleuchtung links:* 4. Fensterloser Innenraum mit Beleuchtung durch einen rötlichen leuchtenden Strahler.
- *Beleuchtung rechts:* 5. Fensterloser Innenraum mit Beleuchtung durch einen bläulich leuchtenden Strahler.
- *Oben:* Unkalibriertes Kamerabild.
- *Mitte:* Kalibrierung mit optimalem initialen Kameraprofil.
- *Unten:* Kalibrierung mit automatisch angepaßtem Innenraumprofil.

Abbildung C.4.:

- *Beleuchtung links:* 6. Tageslicht bei bewölktem Himmel.
- *Beleuchtung rechts:* 6a. Tageslicht bei bewölktem Himmel mit Weißabgleich der Kamera.
- *Oben:* Unkalibriertes Kamerabild.
- *Mitte:* Kalibrierung mit optimalem initialen Kameraprofil.
- *Unten:* Kalibrierung mit automatisch angepaßtem Innenraumprofil.

Abbildung C.5.:

- *Beleuchtung links:* 7. Tageslicht bei Sonnenschein.
- *Beleuchtung rechts:* 7a. Tageslicht bei Sonnenschein mit Weißabgleich der Kamera.
- *Oben:* Unkalibriertes Kamerabild.
- *Mitte:* Kalibrierung mit optimalem initialen Kameraprofil.
- *Unten:* Kalibrierung mit automatisch angepaßtem Innenraumprofil.

C.2. Bilder zur Extraktion von Hautfarbtönen

Auf den folgenden Seiten befinden sich in den Abbildungen C.6 bis C.9 Farbbilder, die die Ergebnisse der in Abschnitt 8.4 durchgeführten Untersuchungen zur Beleuchtungsinvarianten Extraktion von Hautfarbtönen aus Kamerabildern zeigen. Diese Bilder wurden in Abschnitt 8.4.2 detailliert beschrieben.

Abbildung C.9 stellt beispielhaft einige der Bilder dar, aus denen denen die Werte für eine Eingrenzung der Hautfarben in den jeweiligen Farbräumen gewonnen wurden. In den Abbildungen C.6, C.7 und C.8 sind Ergebnisse der Farbextraktion dargestellt, die rot markierten Bildpunkte werden dabei den Hautfarben zugeordnet. Zudem ist ein rechteckiger Rahmen um Bereiche gezogen, in denen mehr als 50% Bildpunkte als Hautfarbe klassifiziert werden.

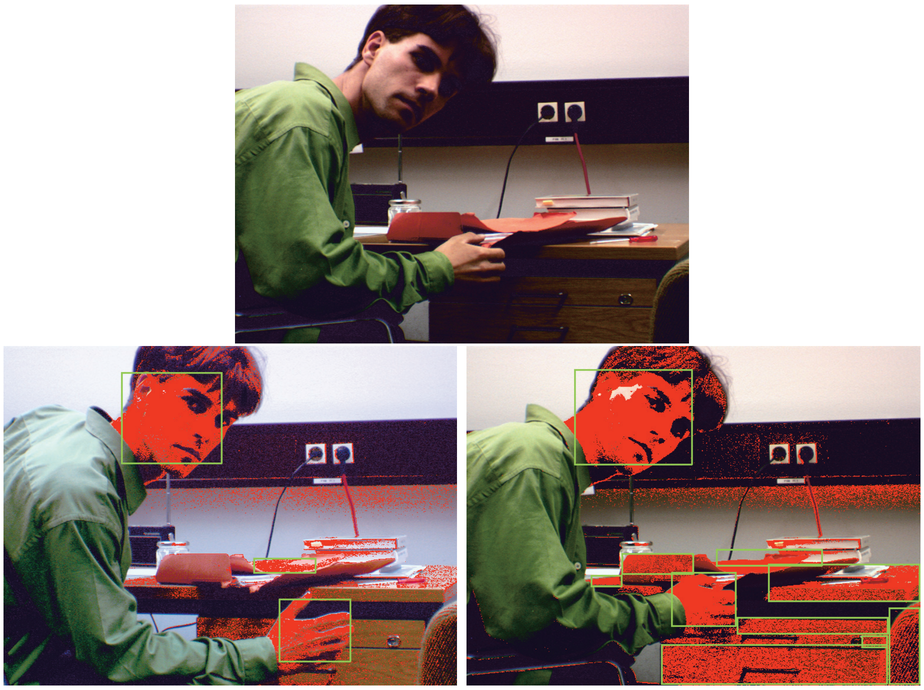

Abbildung C.6.:

- *Beleuchtungsbedingung:* 1. Fensterloser Innenraum mit heller Beleuchtung durch Neonröhren.
- *Oben:* Unkalibriertes Kamerabild.
- *Unten Links:* Kalibrierung mit automatisch angepaßtem Innenraumprofil und Extraktion der Hautfarben in der L*a*b*-Darstellung.
- *Unten Links:* Unkalibriertes Kamerabild mit Hautfarbextraktion in der RGB'-Darstellung.

Abbildung C.7.:

- *Beleuchtung links:* 1. Fensterloser Innenraum mit heller Beleuchtung durch Neonröhren.
- *Beleuchtung rechts:* 2. Fensterloser Innenraum mit dunkler Beleuchtung durch Neonröhren.
- *Oben:* Unkalibriertes Kamerabild.
- *Mitte:* Kalibrierung mit automatisch angepaßtem Innenraumprofil und Hautfarbextraktion in L*a*b*.
- *Unten:* Unkalibriertes Kamerabild mit Hautfarbextraktion in RGB'.

Abbildung C.8.:

- *Beleuchtung links:* 4. Fensterloser Innenraum mit Beleuchtung durch einen rötlichen leuchtenden Strahler.
- *Beleuchtung rechts:* 5. Fensterloser Innenraum mit Beleuchtung durch einen bläulich leuchtenden Strahler.
- *Oben:* Unkalibriertes Kamerabild.
- *Mitte:* Kalibrierung mit automatisch angepaßtem Innenraumprofil und Hautfarbextraktion in L*a*b*.
- *Unten:* Unkalibriertes Kamerabild mit Hautfarbextraktion in RGB'.

Abbildung C.9.: Bilder zur Bestimmung der Farbbereiche für die Hautfarbextraktion. Alle Hautfarben in diesen Bildern werden zufriedenstellend lokalisiert. Links sind die Bilder dargestellt, aus denen der RGB'-Farbbereich gewonnen wurde, und rechts die nach RGB transformierten L*a*b*-Bilder, zur Gewinnung des L*a*b*-Farbbereiches.

Literaturverzeichnis

[1] H. Lang. *Farbwiedergabe in den Medien.* Muster-Schmidt Verlag, Göttingen, ISBN: 3-7881-4052-6, 1995.

[2] R. Klette, A. Koschan, K. Schlüns. *Computer Vision - Räumliche Information aus digitalen Bildern.* Vieweg-Verlag, ISBN: 3-528-06625-3, 1996.

[3] S.J.Sangwine, R.E.N. Horne. *The Colour Image Processing Handbook.* Chapman & Hall Verlag, ISBN: 0-412-80620-7, 1998.

[4] R. Jain, R. Kasturi, B.G. Schunck. *Machine Vision.* McGraw-Hill Series in Computer Science, New York, ISBN: 0-070-32018-7, 1995.

[5] D.H. Hubel. *Auge und Gehirn, Neurobiologie des Sehens.* Spektrum der Wissenschaft, Heidelberg, ISBN: 3-922508-92-8.

[6] A. Koschan. *Digitale Farbbildverarbeitung, Erfordernisse und Möglichkeiten.* Habilitationsschrift am Institut für Technische Informatik der Technischen Universität Berlin, 1998.

[7] R.L. Lee. *Colorimetric calibration of a video digitizing system: Algorithm and applications.* Color Research and Application 13(3), pp.180-186, 1988.

[8] N.J.C. Strachan, P. Nesvadba, A.R. Allen. *Calibration of a video camera digitizing system in the CIE L*u*v* colour space.* Pattern Recognition Letters, Vol.11, pp.771-777.

[9] E. Marszalec, M. Pietikäinen 1994. *On-line color camera calibration.* Proceedings of 12$^{\text{th}}$ IAPR International Conference on Pattern Recognition, Volume A: Computer Vision and Image Processing, Jerusalem, Israel, pp.232-237, 1990.

[10] D. Kollhoff, H. Kempe. *Verfahren zur farbmetrischen Kalibrierung.* Volker Rehrmann (Hrsg.), Proceedings des 1. Workshop Farbbildverarbeitung, Koblenz, pp.5-8, 1995.

[11] P.M. Hubel, J. Holm, G.D. Finlayson, M.S. Drew. *Matrix Calculations for Digital Photography.* Proceedings of the Fifth Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications, Scottsdale, Arizona, pp.105-111, 1997.

[12] G.D. Finlayson, M.S.Drew. *White-point preserving color correction.* Proceedings of the Fifth Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications, Scottsdale, Arizona, pp.258-261, 1997.

[13] G.D. Finlayson, B. Schiele, J.L. Crowley. *Comprehensive Colour Image Normalization.* Lecture Notes in Computer Science Bd.1406, Springer-Verlag, pp.475-490, 1998.

[14] T. Young. *On the theory of light and colours.* Philos. Transactions Royal Society London, Vol.92, pp.20-71, 1802.

[15] E. Hering. *Zur Lehre vom Lichtsinn.* Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften zu Wien, 1872.

[16] J. von Kries. *Theoretische Studien zur Umstimmung des Sehorgans.* Festschrift der Universität Freiburg, pp. 144-158, 1902.

[17] W.D. Wright. *A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours.* Transactions Opt. Society, Vol.30, London, pp.144-164, 1928-29.

[18] American National Standardisation Institute (ANSI). *Graphic technology - Prepress digital data exchange - Colour targets for input scanner calibration.* American National Standards IT8.7/1-1993 und IT8.7/2-1993, 1993.

[19] International Color Consortium (ICC). *ICC Profile Format Specification.* Version 3.4, 1997.

[20] Commission Internationale de l´Eclairage (CIE). *Industrial Color-Difference Evaluation.* Technical Report, CIE 116-1995, 1995.

[21] P.V.C. Hough. *Methods and Means for Recognizing Complex Patterns.* US Patent 3.069.654, US Patent Office, 1962.

[22] T. Sakamoto, A. Itooka. *Lineares Interpolationsverfahren für Farbsignale in einem Speicher.* Offenlegungsschrift 28.13.519 des Deutschen Patentamtes, Kyoto (Japan), 1978.

[23] G. Bestmann. *Verfahren zur Einrichtung und Kalibrierung von Farbwerten.* Offenlegungsschrift 43.05.693 des Deutschen Patentamtes, 1993.

[24] J.F. Canny. *A computational apporoach to edge detection.* IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.8, No.6, pp. 679-698, 1986.

[25] T. Kansade. *Image understanding research at CMU.* Proceedings of the Image Understanding Workshop, Vol.3, Los Angeles, pp.32-40, 1987.

[26] M.J. Swain, D.H. Ballard. *Color Indexing.* International Journal of Computer Vision, Vol.7, No.1, pp.11-32, 1991.

[27] U. Mahlmeister, H. Pahl, G. Sommer. *Color-Orientation Indexing.* B. Jähne, P. Geißler, H. Hausecker, F. Hering (Hrsg.), Mustererkennung, Tagungsband des 18. DAGM-Symposiums, Heidelberg, Springer-Verlag, pp.3-10, 1996.

[28] B.V. Funt, G.D. Finlayson. *Color constant color indexing.* IEEE Transacrions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.17, pp.522-529, 1995.

[29] M.S. Drew, J. Wei, Z.N. Li. *Illuminantion-Invariant Color Object Recognition via Compressed Chromaticity Histograms of Normalized Images.* Proceedings of the International Conference on Computer Vision 1998, Bombay, Indien, pp.533-540, 1998.

[30] B.V. Funt, B. Barnard, L. Martin. *Is Machine Colour Constancy Good Enough.* Proceedings of the 5^{th} European Conference on Computer Vision, pp.445-459, 1998.

[31] D.H. Ballard, C.M. Brown. *Computer Vision.* Prentice Hall Verlag, New York, 1982.

[32] R.W.G. Hunt. *Revised Colour-Appearance Model for Related and Unrelated Colours.* Color Research and Application, Vol.16, pp.146-165, 1991.

[33] C.S. McCamy, H.Marcw, J.G. Davidson. *A color-rendition chart.* Journal of Applied Photographic Engineering, Vol.2, No.3, pp.95-99, 1976.

[34] J. Pauli. *Geometric/Photometric Consensus and Regular Shape Quasi-Invariants for Object Localization and Boundary Extraction.* Technischer Bericht Nr. 9805, Instituts für Informatik und Praktische Mathematik der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 1998.

[35] V. Krüger, R. Herpers, K. Daniilidis, G. Sommer. *Teleconferencing Using an Attentive Camera System.* Lehrstuhl für Kognitive Systeme der CAU-Kiel, 1998.

Erklärung:

Hiermit versichere ich, daß ich die vorliegende Arbeit selbständig verfaßt und ausschließlich die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Kiel, den