

Schattenentfernung in Bildserien unter Verwendung des Retinex-Algorithmus

Diplomarbeit

zur Erlangung des Grades eines/r Diplom-Informatikers / Diplom-Informatikerin im Studiengang Computervisualistik

vorgelegt von

Sarah Steinmetz

Betreuer: Dipl.-Ing. Wolfram Hans, Institut für Computervisualistik, Fachbereich Informatik
Erstgutachter: Dipl.-Ing. Wolfram Hans, Institut für Computervisualistik, Fachbereich Informatik
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Dietrich Paulus, Institut für Computervisualistik, Fachbereich Informatik

Koblenz, im November 2007

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat und von dieser als Teil einer Prüfungsleistung angenommen wurde. Alle Ausführungen, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche gekennzeichnet.

Die Richtlinien der Arbeitsgruppe für Studien- und Diplomarbeiten habe ich gelesen und anerkannt, insbesondere die Regelung des Nutzungsrechts.

Mit der Einstellung dieser Arbeit in die Bibliothek bin ich einverstanden. ja nein

Der Veröffentlichung dieser Arbeit im Internet stimme ich zu. ja nein

Koblenz, den

Unterschrift

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Umsetzung und Modifikation des Verfahrens von Finlayson et al. [FHD02b] zur Schattenentfernung in einzelnen Farbbildern unter Verwendung des Retinex-Algorithmus vorgestellt. Für die benötigte Detektion von Schattenkanten wurde ein Verfahren von Finlayson et al. [FHD02a] umgesetzt und angepasst. Die erforderliche Kamerakalibrierung wurde dabei nicht, wie in [FHD02a], mit Tageslicht, sondern unter Verwendung künstlicher Lichtquellen realisiert. Anhand von Campus-Bildsequenzen wird in der vorliegenden Ausarbeitung ein qualitativer Vergleich des umgesetzten Verfahrens und des Verfahrens von Weiss zur Schattenentfernung in Bildserien [Wei01] vorgenommen. Außerdem wird ein erster Ansatz vorgestellt, wie Verfahren zur Schattenentfernung quantitativ bewertet werden können. Die Erzeugung der benötigten Ground-Truth Daten wird mit Hilfe von Laboraufnahmen realisiert, sodass keine manuelle Segmentierung von Schatten erforderlich ist. Anhand der Ergebnisse von Experimenten wird gezeigt, inwieweit mit den definierten Maßen eine Bewertung und ein Vergleich der beiden Verfahren erfolgen kann.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich Prof. Dr. Dietrich Paulus und Wolfram Hans für die umfassende Betreuung meiner Arbeit danken. Mein Dank geht auch an alle Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Aktives Sehen, die bei Fragen und Problemen immer gerne ausgeholfen haben. Detlev Droege danke ich zudem für die Einweisung in die Bedienung der Netzwerkkamera. Ich bedanke mich bei Johannes Pellenz, durch den ich besonders im Projektpraktikum vieles gelernt habe, das ich auch bei der Organisation meiner Diplomarbeit nutzen konnte. Für die Bereitstellung von Experimentiermaterial danke ich Klaus Michaelis und Jürgen Schwab von der Abteilung Physik des Instituts für Integrierte Naturwissenschaften und Thorsten Grosch, ehemaliger Mitarbeiter der Arbeitsgruppe Computergraphik. Frank Schmitt vom Labor Bilderkennen danke ich für den hilfreichen Hinweis, welchen Raum ich für Experimente nutzen kann.

Außerdem möchte ich mich besonders bei Raimondo Gelo für die fachliche und persönliche Unterstützung während des gesamten Studiums bedanken. Mein besonderer Dank geht an meine Mutter, Annette Steinmetz, die mir dieses Studium ermöglicht hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	13
1.1	Problemstellung und Motivation	13
1.2	Beitrag der Arbeit	14
1.3	Aufbau der Arbeit	16
2	Grundlagen	17
2.1	Klassifikation von Schatten	17
2.2	Bildentstehungsmodell	18
2.3	Intrinsische Bilder, Farbkonstanz, Beleuchtungsinvarianz	19
2.4	Planck'sche Strahler	21
3	Schattendetektion und Schattenentfernung	25
3.1	Stand der Technik	25
3.2	Verfahren von Weiss	30
3.3	Verfahren von Finlayson et al.	34
4	Detektion der Schattenkanten	37
4.1	Beleuchtungsinvariante Darstellung	37
4.1.1	Verwendung des Geometric Mean 2-D Chromatizitäts-Raums	40

4.1.2	Informationsverlust	42
4.1.3	Umgang mit nicht erfüllten Annahmen	42
4.2	Bestimmung der Invarianten Richtung	43
4.2.1	Entropieminimierung	43
4.2.2	Kamerakalibrierung	45
4.3	Berechnung des Schattenkantenbilds	50
4.4	Einschränkungen	53
5	Schattenentfernung mit dem Retinex-Algorithmus	57
5.1	Retinex-Theorie	57
5.1.1	Experimente zur menschlichen Farbwahrnehmung	58
5.1.2	Pfadbasierter Retinex-Algorithmus nach Land	59
5.1.3	Alternative Retinex-Verfahren	63
5.2	Schattenentfernung mit dem pfadbasierten Retinex	64
5.2.1	Umsetzung	65
5.2.2	Einschränkungen	69
6	Ansatz zur quantitativen Bewertung	75
6.1	Vorschläge aus der Literatur	75
6.2	Eigener Ansatz zur Bewertung der Schattenentfernung	77
6.2.1	Anforderungen an die Schattenentfernung	77
6.2.2	Technische Bewertungsmaße	78
6.2.3	Bewertung des Verfahrens von Weiss	83
6.2.4	Vergleich der Verfahren	84
7	Experimente und Ergebnisse	87

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	11
7.1 Kameras und Bildmaterial	87
7.2 Kalibrierung des invarianten Winkels	89
7.2.1 Netzwerkkamera	89
7.2.2 Firewire Kamera	92
7.3 Qualitative Bewertung mit den Campusbildserien	93
7.3.1 Verfahren nach Finlayson et al.	93
7.3.2 Verfahren von Weiss	95
7.4 Quantitative Bewertung mit Laboraufnahmen	96
7.4.1 Erzeugung von Ausgangs- und Ground-Truth Daten	96
7.4.2 Versuchsdurchführung	100
7.4.3 Ergebnisse	102
7.4.4 Validierung und Verifikation	105
7.5 Zusammenfassende Bewertung der Verfahren	113
8 Zusammenfassung	115
A Nebenrechnungen	121
B Kameraeinstellungen und Parameterbelegungen	123
B.1 Kameraeinstellungen	123
B.2 Parameterbelegungen	123
C Eingabebilder	129
C.1 Campussequenzen	129
C.2 Laborsequenzen	129
D Bilder des Laboraufbaus	133

E Technische Umsetzung	135
E.1 Installationsanleitung	135
E.2 Erweiterungen des MATLAB-Codes von Weiss	136
E.3 GUI zur Kamerakalibrierung	137
E.4 Schattendetektion und Schattenentfernung	140
E.5 Skriptbasierte Evaluation	143
F Inhalte der CD	149
Literaturverzeichnis	151

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Die Detektion und Entfernung von Schatten ist in verschiedenen Bereichen der Bildverarbeitung von Interesse. Für viele Verfahren stellen Schatten ein Problem dar, wenn nicht erkannt wird, dass diese keine Oberflächeneigenschaft, sondern den Effekt einer Beleuchtungsänderung darstellen. Beim Tracking kann zum Beispiel ein Schatten, der sich mit dem zu verfolgenden Objekt bewegt, fälschlicherweise als Teil des Objekts angesehen werden. Zur Detektion bewegter Schlagschatten gibt es daher, besonders im Bereich der Verkehrsüberwachung, verschiedene Ansätze [PMTTC03]. In diesem Anwendungskontext reicht oft bereits die Detektion der Schattensegmente aus. Die Entfernung von Schatten aus einem Bild, das heißt die Berechnung der Darstellung der Szene ohne Schatten, kann aber auch im Bereich der Segmentierung und Objekterkennung hilfreich sein [FHD02a]. Ein weiteres Anwendungsgebiet der Schattenentfernung besteht in der Bildverbesserung [FHD02b]. So kann zum Beispiel gewünscht sein, aus der Fotografie einer bestimmten Szene störende Schlagschatten zu entfernen. Eine mögliche konkrete Anwendung ist die Entfernung von Schatten aus den Bildern der Sequenz, welche die Entstehung des Universitäts-Campus Koblenz dokumentiert. Beim Bau des Campus wurden mit einer Web-Kamera täglich Bilder in unterschiedlichen Positionen aufgezeichnet. Die schwankenden Beleuchtungsverhältnisse sollen durch Farbnormalisierung ausgeglichen werden

[DHP03]. Die Entfernung von Schatten in den Bildern könnte diesen Prozess unterstützen.

Im Anwendungsbereich der Bildverbesserung werden oft Umsetzungen des Retinex-Algorithmus [LM71] zur Kompression des Tonwertumfangs eingesetzt [JRW97a]. Dabei wird erreicht, dass Details sowohl in hellen als auch in dunklen, also schattigen, Bereichen sichtbar werden. Um Schlagschatten in einem einzelnen Farbbild nicht nur abzuschwächen, sondern zu entfernen, schlagen Finlayson et al. [FHD02b] eine Adaption des Retinex-Algorithmus vor. Das Verfahren geht davon aus, dass bekannt ist, wo sich im Bild Schattenkanten befinden. Um diese zunächst zu detektieren, wird auf ein Verfahren von Finlayson et al. [FHD02a] verwiesen.

Ein alternatives Verfahren, eine schattenfreie Darstellung zu erhalten, stellt die Berechnung intrinsischer Bilder nach Weiss [Wei01] dar. Hier wird eine Bildsequenz als Eingabe erwartet. Eine MATLAB-Implementierung dieses Verfahrens ist frei zugänglich.¹

Die Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit war, das Verfahren zur Schattenentfernung mit dem Retinex [FHD02b, FHD02a] in C++ umzusetzen. Außerdem sollte untersucht werden, welche Ergebnisse sich mit diesem und dem Verfahren von Weiss [Wei01] erzielen lassen. Dazu sollten die Verfahren mit den Campus-Bildserien erprobt werden. Außerdem sollten Bewertungskriterien definiert werden, um verschiedene Ergebnisse der Schattenentfernung quantitativ vergleichen zu können. Dazu war ein Experiment zu konzipieren und durchzuführen, bei dem im Labor mittels rechnergestützter Beleuchtungsquellen bekannte Schatten entstehen.

1.2 Beitrag der Arbeit

In dieser Arbeit wird das nach Finlayson et al. [FHD02b] umgesetzte Verfahren zur Schattenentfernung in einzelnen Farbbildern unter Verwendung des Retinex-Algorithmus vorgestellt. Dieser pfadbasierte Retinex-Algorithmus führt in der ursprünglichen Version eine Farbkorrektur von Pixelwerten durch. Im Kontext der Schattenentfernung ist jedoch nur die Korrektur der Pixelwerte im Schatten erwünscht, die übrigen Pixelwerte sollen erhalten

¹<http://www.cs.huji.ac.il/~yweiss/intrinsic.tar> [28.11.07]

bleiben. Das Verfahren wurde in der Arbeit daher entsprechend angepasst. Für die erforderliche Detektion von Schattenkanten wurde das vorgeschlagene Verfahren von Finlayson et al. [FHD02a] umgesetzt. Dabei wird zunächst eine beleuchtungsinvariante Darstellung berechnet. Dazu wird ein bestimmter Parameter benötigt, die so genannte *invariante Richtung* [FHD02a]. Diese ist abhängig von den spektralen Eigenschaften der Kamera, mit der das zu bearbeitende Farbbild aufgenommen wurde. Um die invariante Richtung zu bestimmen, wurde zunächst ein Verfahren von Finlayson et al. [FDL04] umgesetzt, das als Eingabe nur das Farbbild mit Schatten benötigt. Der Einsatz des Verfahrens führte bei den Campusbildern zu keinen brauchbaren Ergebnissen. Für die Bestimmung der invarianten Richtung und um festzustellen, ob die Netzwerkkamera, mit der die Campusbilder erzeugt wurden, die Annahmen des Verfahrens ausreichend erfüllt, wurde eine Kamera-Kalibrierung [FHD02a] durchgeführt. Finlayson et al. [FHD02a] erstellen dazu über den Tag verteilt mehrere Außenaufnahmen des Macbeth ColorChecker[®]. In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, wie die Kalibrierung mit künstlichen Lichtquellen realisiert werden kann. Trotz erfolgreicher Kalibrierung stellte sich heraus, dass das Verfahren der Schattenkantendetektion nicht für die Campusbilder geeignet ist. Für die Durchführung von Laborexperimenten wurde daher eine geeignete Firewire-Kamera gewählt und kalibriert. Die einfache Umsetzung der Schattenkantendetektion [FHD02a] führte bei den Laboraufnahmen zu falsch klassifizierten Schattenkantenpixeln. Zur Reduzierung der Fehlklassifikationen wurde das Verfahren entsprechend angepasst.

Anhand der Campus-Bildsequenzen wird ein qualitativer Vergleich des umgesetzten Verfahrens und des Verfahrens von Weiss zur Schattenentfernung in Bildserien [Wei01] vorgenommen. Die Literaturrecherche zu Beginn der Arbeit ergab, dass Verfahren zur Schattenentfernung bisher nur qualitativ bewertet wurden. In dieser Arbeit wurde ein erster Ansatz zur Bewertung von Verfahren zur Entfernung von Schlagschatten anhand von quantitativen Bewertungsmaßen entwickelt. Die benötigten Eingabe- und Ground-Truth Daten wurden im Labor erzeugt. Die Erzeugung bekannter Schatten wurde nicht, wie ursprünglich geplant, mittels rechnergestützter Beleuchtungsquellen realisiert. Dies hätte aufwendige Kalibrierungen erfordert, um die Position des Schattens im Bild zu berechnen. Der Laboraufbau wurde dennoch so konzipiert, dass keine manuelle Segmentierung von Schatten erforderlich ist. Anhand von Experimenten wird untersucht, inwieweit anhand der Ma-

ße eine Bewertung und ein Vergleich von Ergebnissen der Schattenentfernung mit dem Retinex erfolgen kann. Bei dem quantitativen Vergleich dieses und des Verfahrens von Weiss [Wei01] besteht die Schwierigkeit, dass beide nicht die selben Eingabedaten erwarten. Die Verfahren sind daher nur bedingt vergleichbar. Es werden zwei Möglichkeiten des Vergleichs vorgestellt und anhand von Experimenten untersucht.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut: Im folgenden Kapitel 2 werden zunächst grundlegende Begriffe und Zusammenhänge geklärt, die zum Verständnis der weiteren Arbeit nötig sind. Kapitel 3 liefert einen Überblick über vorhandene Verfahren zur Schattendetektion und Schattenentfernung. Die grundlegenden Ideen des Verfahrens von Weiss [Wei01] werden betrachtet, um das nötige Verständnis zu schaffen, das zum Vergleich der Verfahren benötigt wird. Die in der Arbeit umgesetzten Verfahren zur Schattendetektion und -entfernung [FHD02b, FHD02a] werden kurz im Überblick vorgestellt. In Kapitel 4 wird das Verfahren zur Detektion von Schattenkanten [FHD02b], sowie dessen Umsetzung erläutert. Kapitel 5 liefert zunächst einen Einblick in die Retinex-Theorie nach Edwin Land, um dann auf die Schattenentfernung mit dem Retinex [FHD02b] und die Umsetzung und Anpassungen des Verfahrens einzugehen. In Kapitel 6 wird ein erster Ansatz zur quantitativen Bewertung von Verfahren zur Schattenentfernung vorgestellt und die Problematik der Vergleichbarkeit der Verfahren von Weiss [Wei01] und Finlayson et al. [FHD02b, FHD02a] behandelt. Im Anschluss daran werden in Kapitel 7 die im Laufe der Arbeit durchgeführten Experimente und deren Ergebnisse erläutert. Zunächst werden die Ergebnisse der Kalibrierung der verwendeten Kameras vorgestellt. Es folgt eine qualitative Bewertung des Verfahrens von Weiss und des in der Arbeit umgesetzten Verfahrens bei Anwendung auf die Campusbildsequenzen. Anschließend werden die Laborexperimente zur quantitativen Bewertung der Verfahren beschrieben und die Ergebnisse präsentiert und ausgewertet. In Kapitel 8 werden die Ergebnisse der Arbeit abschließend zusammengefasst.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Klassifikation von Schatten

Ein Schatten entsteht, wenn ein Objekt das Licht einer direkten Lichtquelle teilweise oder vollständig verdeckt [CGPP03]. Schatten können in zwei Klassen unterteilt werden [CGPP03, XQJ⁺06]: *Schlagschatten* und *Selbstschatten*. Ein Selbstschatten ist der Bereich auf einem Objekt, der nicht direkt von der Lichtquelle beleuchtet wird. Ein Schlagschatten ist die Projektion des Objekts, das die Lichtquelle verdeckt, in Richtung des direkten Lichts. Bei den Schlagschatten werden die Bereiche *Kernschatten* und *Halbschatten* unterschieden. In den Bereich des Kernschattens gelangt keine Strahlung der verdeckten Lichtquelle. Der Bereich des Halbschattens ist der Übergang vom Kernschatten in den beleuchteten Bereich, mit zunehmender Beleuchtung durch die direkte Lichtquelle. Der Schatten kann somit durch eine weiche oder eine scharfe Schattenkante abgegrenzt sein, je nachdem wie ausgedehnt der Bereich des Halbschattens ist. Selbstschatten besitzen meist eine unklar definierte Schattengrenze. Durch die Änderung der Oberflächennormale entsteht ein Übergang vom beleuchteten in den schattigen Bereich, im Folgenden Shadingeffekt genannt.

Welche genauen (geometrischen oder spektralen) Eigenschaften für mögliche Schatten in einer Szene angenommen werden, hängt vom jeweiligen Verfahren und Anwendungskontext ab. So kann die spektrale Eigenschaft des Schattens z. B. als lokale Änderung der

Intensität der Lichtquelle [SCE04] oder als lokale Änderung der Intensität und Farbe der Lichtquelle [FHLD06] beschrieben werden.

2.2 Bildentstehungsmodell

In der Bildverarbeitung wird meist von dem folgenden, bereits stark vereinfachten Bildentstehungsmodell ausgegangen [BF02, HGF⁺06]:

$$f^{(k)}(\mathbf{x}) = \int_{\lambda_s} E(\lambda, \mathbf{x}^w) \rho(\lambda, \mathbf{x}^w) R_k(\lambda) d\lambda \quad (2.1)$$

Der Wert $f^{(k)}(\mathbf{x})$ an Pixelposition \mathbf{x} im Kanal k , mit $k \in \{r, g, b\}$ ergibt sich aus dem Integral $\int_{\lambda_s} d\lambda$ über das sichtbare Spektrum λ_s des Produkts von Bestrahlungsstärke $E(\lambda, \mathbf{x}^w)$ und spektraler Reflektanz $\rho(\lambda, \mathbf{x}^w)$ am Oberflächenpunkt \mathbf{x}^w für die Wellenlänge λ und der spektralen Empfindlichkeit $R_k(\lambda)$ des k -ten Kamerasensors. Das Modell geht von den folgenden einschränkenden Annahmen aus: Die abgebildete Szene besteht nur aus Lambert'schen Flächen, die bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion der Oberfläche ist also konstant in alle Richtungen und nur abhängig von Ort und Wellenlänge. Die Belichtungszeit wird nicht berücksichtigt und es wird ein linearer Zusammenhang angenommen zwischen der Intensität des Lichts, das auf den Sensor trifft, und den Pixelwerten. Die meisten CCD-Sensoren liefern lineare Antworten [RSYD05], aber diese Rohdaten sind bei vielen Kameras nicht zugänglich. Die Kamerahersteller fügen zudem oft nichtlineare Verarbeitungsschritte wie Gamma-Korrektur und JPEG-Kompression hinzu.

Die Verfahren, die in dieser Arbeit genauer betrachtet werden [LM71, Wei01, FH01, FHD02a, FHD02b], gehen außerdem davon aus, dass die Sensorempfindlichkeitskurven der Kamera perfekt schmalbandig sind. Der k -te Sensor reagiert also nur auf eine bestimmte Wellenlänge λ_k , sodass die spektrale Empfindlichkeit des Sensors durch eine Dirac Delta Funktion approximiert werden kann:

$$R_k(\lambda) = \delta(\lambda - \lambda_k) \quad (2.2)$$

Diese Annahme führt zum folgenden, weiter vereinfachten, Modell der Bildentstehung:

$$f^{(k)}(\mathbf{x}) = E(\lambda_k, \mathbf{x}^w) \rho(\lambda_k, \mathbf{x}^w). \quad (2.3)$$

Die perfekte Schmalbandigkeit wird von üblichen Kameras nicht erfüllt, in der Praxis wird aber davon ausgegangen [FH01], dass die Sensoren entweder annähernd schmalbandig genug sind, oder diese Bedingung durch eine Spectral Sharpening Transformation [FDF94] erfüllt werden kann. Bei Betrachtung einer bestimmten Pixelposition kann im Folgenden auch die vereinfachte Darstellung

$$f^{(k)} = E(\lambda_k)\rho(\lambda_k) \quad (2.4)$$

verwendet werden.

2.3 Intrinsische Bilder, Farbkonstanz, Beleuchtungsinvarianz

Die grundlegende Herausforderung bei der Entfernung oder zunächst Detektion von Schatten ist, zu erkennen, ob eine Intensitätsänderung, also eine Änderung der Pixelwerte, auf eine Änderung der Reflektanz oder der Beleuchtung zurückzuführen ist. Es gibt verschiedene Ansätze, die sich (unabhängig vom Kontext der Schattenentfernung) mit dieser fundamentalen Problematik auseinandersetzen. Hierzu zählen *Intrinsische Bilder*, *Farbkonstanz* und *Beleuchtungsinvarianz*. Im Folgenden werden diese Ansätze kurz vorgestellt, wobei die Abgrenzung, welcher Ansatz von einem bestimmten Verfahren verfolgt wird, oft nicht klar ist, da die drei Themengebiete sehr eng miteinander verknüpft sind.

Barrow und Tenenbaum [BT78] haben den Begriff *Intrinsische Bilder* eingeführt. Ausgehend von der Annahme, dass sich die Pixelwerte aus dem Produkt von Reflektanz und Beleuchtung ergeben, wird versucht, ein Bild in die beiden Anteile Reflektanz und Beleuchtung zu zerlegen. So ergeben sich zwei intrinsische Bilder, ein Reflektanzbild und ein Beleuchtungsbild. Das Reflektanzbild ist unabhängig von Beleuchtungseinflüssen und somit auch frei von Schatten. Das in Abschnitt 3.2 vorgestellte Verfahren von Weiss [Wei01] verfolgt diesen Ansatz. Auch die Retinex [LM71] und Lightness Algorithmen [Hor74, Bla83] können als Versuch angesehen werden, intrinsische Reflektanzbilder zu berechnen [FHL06]. Die Grundannahme dieser Verfahren ist, dass starke Schwankungen in der Intensität durch Reflektanzänderung und leichte Schwankungen durch nicht uniforme Beleuchtung verursacht werden. Die Verfahren versuchen den Einfluss schwankender

Beleuchtung zu eliminieren und ein so genanntes *Lightness*-Bild [LM71] zu berechnen. Der Begriff *Lightness* wurde gewählt, da nicht die tatsächlichen Reflektanzen berechnet werden. Land hat diesen Begriff zuerst verwendet und versteht *Lightness* als Entsprechung für die biologisch wahrgenommenen Reflektanzen [Lan77], wie sie vom menschlichen Wahrnehmungssystem bestimmt würden.

Der Retinex-Algorithmus wird daher auch eher den *Farbkonstanzalgorithmen* zugeordnet [Ebn07]. *Farbkonstanz* ist die Fähigkeit des menschlichen Wahrnehmungssystems, die Farbe von Objekten unabhängig von der Beleuchtung zu bestimmen. Die bestimmten Werte entsprechen aber nicht den tatsächlichen Reflektanzen [Ebn07]. Farbkonstanzalgorithmen gehen meist von uniformer oder lokal nur leicht schwankender Beleuchtung aus. Die Retinex und *Lightness*-Verfahren versuchen zwar den Einfluss nicht uniformer Beleuchtung zu eliminieren, starke Beleuchtungsschwankungen, wie sie durch Schatten verursacht werden, können aber nicht entfernt werden. Zur Schattenentfernung wurden daher verschiedene Modifikationen der Verfahren entwickelt (s. Abschnitt 3.1).

Ein alternativer Ansatz, den Einfluss der Beleuchtung zu eliminieren, besteht darin, eine *beleuchtungsinvariante* Darstellung zu berechnen. Durch Transformation der Bildwerte werden invariante Größen berechnet, die nur noch von der Reflektanz des dargestellten Oberflächenpunkts abhängen. Die transformierten Werte müssen dabei keine RGB-Farbwerte mehr darstellen, sondern sind oft zweidimensionale oder auch eindimensionale Werte, die eine bestimmte Reflektanz repräsentieren. Je nach Anwendungskontext (z. B. weiße oder farbige Beleuchtung, matte oder spekulare Szenen, uniforme oder nicht uniforme Beleuchtung) werden verschiedene invariante Darstellungen vorgeschlagen [FF95, GS97, GDB⁺99, FH01], wobei diese gegenüber einem oder mehreren Einflüssen, wie Intensität der Lichtquelle, Farbe der Lichtquelle, Beleuchtungsrichtung, Oberflächenorientierung und Spekularität invariant sein können. Beleuchtungsinvariante Darstellungen werden in verschiedenen Verfahren verwendet, um Schatten zu detektieren (s. Abschnitt 3.1).

2.4 Planck'sche Strahler

Das in Kapitel 4 beschriebene Verfahren zur Detektion von Schattenkanten geht davon aus, dass die Beleuchtung in der Szene als Planck'scher Strahler approximiert werden kann. Daher werden hier die benötigten theoretischen Grundlagen zusammengefasst.

Lichtquellen werden durch ihr Leistungsspektrum beschrieben. Dieses wird in der Regel als Strahlungsflussspektrum angegeben. Für eine kompaktere Beschreibung von Lichtquellen ist das Konzept des Planck'schen Strahlers von Bedeutung.

Ein Planck'scher Strahler, auch schwarzer Körper genannt, ist ein idealisierter Körper, der die gesamte elektromagnetische Strahlung, die auf ihn trifft, absorbiert. Wenn ein schwarzer Körper erhitzt wird, gibt er Strahlung ab. Das Strahlungsspektrum ist dabei nur von der Temperatur des Körpers abhängig. [WS82]

Das Strahldichtespektrum eines Planck'schen Strahlers wird in Abhängigkeit der Temperatur T , gemessen in Kelvin, durch

$$L(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\left(e^{\frac{hc}{k_B T \lambda}} - 1\right)} \quad (2.5)$$

beschrieben, mit der Planck'schen Konstante $h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$, Boltzmanns Konstante $k_B = 1,3806 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$, der Lichtgeschwindigkeit $c = 2,9979 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und der Wellenlänge λ . [Ebn07]

Für $\lambda < 700 \text{ nm}$ und $T < 10000 \text{ K}$ kann Wiens Approximation [FHL06, Ebn07] verwendet werden:

$$L(\lambda, T) \approx c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{T \lambda}}, \quad (2.6)$$

mit $c_1 = 2hc^2$ und $c_2 = \frac{hc}{k_B}$. Durch die Variable I kann auch die Intensität der jeweiligen Lichtquelle modelliert werden [Ebn07]:

$$L(\lambda, T) \approx I c_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{c_2}{T \lambda}}. \quad (2.7)$$

Mit Hilfe des Konzepts des Planck'schen Strahlers, kann eine Lichtquelle durch Angabe ihrer Farbtemperatur charakterisiert werden. In [WS82] wird dabei genauer unterschieden zwischen Verteilungstemperatur, Farbtemperatur und korrelierter Farbtemperatur: Die

Verteilungstemperatur ist definiert als die Temperatur des Planck'schen Strahlers, dessen Spektrum annähernd proportional ist zum Spektrum der Lichtquelle. In diesem Fall liefern beide Spektren die selben Chromatizitätskoordinaten im CIE 1931 (x,y)-Chromatizitätsdiagramm. Für eine Lichtquelle kann eine *Farbtemperatur* angegeben werden, wenn es einen Planck'schen Strahler einer bestimmten Temperatur gibt, dessen Spektrum annähernd die selben (x,y)-Chromatizitätswerte besitzt wie das Spektrum der Lichtquelle. Die Farbtemperatur entspricht dann der Temperatur dieses Planck'schen Strahlers. Wenn für Chromatizitätswerte einer Lichtquelle keine annähernd gleichen Chromatizitätswerte eines Planck'schen Strahlers existieren, so kann nur eine *korrelierte Farbtemperatur* angegeben werden. Diese entspricht der Temperatur des Planck'schen Strahlers, dessen Spektrum einen dieser Lichtquelle ähnlichsten Farbeindruck hervorruft. Die Chromatizitätskoordinaten eines Planck'schen Strahlers bei verschiedenen Temperaturen bilden den so genannten Planck'schen Ort, eine Kurve im CIE 1931 (x,y)-Chromatizitätsdiagramm, dargestellt in Abbildung 2.1.

Nach [WS82] können nur wenige künstliche Lichtquellen als Planck'sche Strahler approximiert werden. Das Spektrum bestimmter glühender Materialien, wie Kohle, Platin und Wolfram ähnelt dem eines Planck'schen Strahlers. In Glühbirnen wird als Material für den Glühdraht meist Wolfram verwendet. Wolfram-Glühfadenlampen oder Halogen-glühlampen können somit als Planck'scher Strahler bestimmter Farbtemperatur approximiert werden. Gasentladungslampen wie Kohlebogenlampen, Quecksilberdampf lampen und Leuchtstofflampen liefern Linienspektren, häufig überlagert mit einem mehr oder weniger kontinuierlichen Spektrum (z. B. bei Kohlebogenlampen). Aufgrund der überlagerten Linienspektren sind die Spektren in der Regel nicht mit denen Planck'scher Strahler vergleichbar. Nur in manchen Fällen kann eine Farbtemperatur angegeben werden. Leuchtstofflampen können zum Beispiel nur durch Angabe einer korrelierten Farbtemperatur beschrieben werden.

Die Chromatizitätskoordinaten zu Strahlungsflussspektren, die in typischen Tageslichtphasen an der Erdoberfläche gemessen wurden, liegen etwas oberhalb und annähernd parallel zum Planck'schen Ort [WS82]. Der so genannte Tageslicht Ort ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

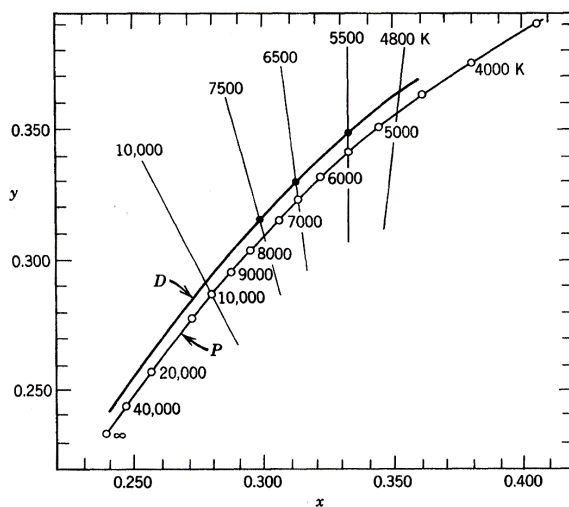


Abbildung 2.1: Planck'sche Ortslinie (P) und Tageslicht Ortslinie (D) im CIE 1931 (x,y)-Chromatizitätsdiagramm (Quelle: [WS82]).

Streng genommen, können unter den genannten Lichtquellen nur die Spektren von Wolframglühfadenlampen durch Spektren Planck'scher Strahler approximiert werden [WS82, Mal02]. Für den in Kapitel 4 beschriebenen Anwendungskontext wurde aber festgestellt [FH01, DCHF02], dass es ausreicht, wenn die (x,y)-Chromatizitätskoordinaten der Lichtquelle zumindest nahe der Planck'schen Ortskurve liegen. Nach [FH01] ist dies auch für Licht erfüllt, das sich aus der Überlagerung des Lichts mehrerer Lichtquellen, deren (x,y)-Chromatizitätskoordinaten jeweils nahe des Planck'schen Orts liegen, erfüllt.

Kapitel 3

Schattendetektion und Schattenentfernung

3.1 Stand der Technik

Bei der Literaturrecherche fällt auf, dass es mehr Verfahren zur Detektion als zur Entfernung von Schatten gibt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in einigen Anwendungsfällen die Detektion von Schattensegmenten bereits ausreicht und keine Darstellung der Szene ohne Schatten erforderlich ist. Bei der Objektverfolgung genügt z. B. zu erkennen, dass eine bewegte Region einen Schatten und nicht Teil des gesuchten Objekts darstellt. Besonders zur Detektion bewegter Schatten liegen zahlreiche Verfahren und auch Vergleichsstudien vor [PMTTC03], da die Erkennung von Schatten entscheidend ist für die robuste Objektdetektion bei der Analyse dynamischer Szenen. Bezüglich der Schattenentfernung wurden bisher keine umfassenden Vergleichsstudien veröffentlicht. In [XQJ⁺06] wird eine nicht veröffentlichte Übersicht von Verfahren zur Schattendetektion und Schattenentfernung vorgestellt. Die dort aufgeführten Verfahren entsprechen im Wesentlichen den Ergebnissen der eigenen Literaturrecherche.

Schattendetektion Verfahren zur Schattendetektion können zunächst danach klassifiziert werden, ob sie auf Bildsequenzen oder Einzelbildern arbeiten. Weiter kann eine Un-

terscheidung in modellbasierte und eigenschaftsbasierte Verfahren vorgenommen werden [SCE04].¹ Modellbasierte Verfahren benötigen Modellwissen über die dargestellte Szene und werden für spezifische Anwendungen, wie z. B. die Analyse von Luftbildaufnahmen [WHR91], entwickelt. Aufgrund ihrer Komplexität und beschränkten Einsetzbarkeit werden sie im Folgenden nicht weiter betrachtet. Bei den eigenschaftsbasierten Verfahren kann unterschieden werden, ob geometrische oder spektrale Eigenschaften von Schatten herangezogen werden, um diese zu detektieren. Des Weiteren unterscheiden sich die Verfahren darin, ob Schattenregionen oder Schattenkanten detektiert werden.

Meist werden spektrale Eigenschaften wie Intensität, Farbe oder Sättigung untersucht. Die Verfahren stützen sich dabei auf unterschiedliche Annahmen über spektrale Eigenschaften von Beleuchtung und Schatten. Wie bei dem in dieser Arbeit umgesetzten Verfahren nach Finlayson et al. [FHD02a] (s. Abschnitt 3.3, Kapitel 4) basiert die Schattendetektion oft auf der Berechnung einer invarianten Darstellung.

In [CGPP01] wird ein Hintergrundsubtraktionsalgorithmus zur Detektion bewegter Schlagschattenregionen vorgestellt. Das Verfahren geht davon aus, dass sich im Schatten die Helligkeit einer Fläche stark ändert, die Farbinformation aber kaum. Zur Überprüfung dieser Kriterien wird der HSV-Raum verwendet. Der statistische Hintergrundsubtraktionsalgorithmus in [HHD99] basiert auf den selben Annahmen. Die Detektion bewegter Schlagschattenregionen erfolgt in [SMO99] anhand von Frame-Differenzen. Ein bewegter Schatten verursacht eine große Framedifferenz, da eine starke Lichtquelle und somit starke Schatten angenommen werden. Kamera und Hintergrund werden als statisch angenommen. Außerdem wird ein texturierter Hintergrund erwartet, sodass Bildregionen, die sich durch einen Schatten ändern, von Regionen, die durch ein bewegtes Objekt verdeckt werden, unterschieden werden können. Für die Lichtquelle wird eine gewisse Ausdehnung angenommen, sodass weiche Schatten entstehen. Die Kantenbreite im Kantenbild des Differenzbilds kann dann genutzt werden, um zwischen der harten Kontur des bewegten Objekts und der weichen Kontur des bewegten Schattens zu unterscheiden. Problematisch ist dieses Vorgehen bei Outdoor-Aufnahmen, da aufgrund der weit entfernten Lichtquelle meist scharfe Schattengrenzen entstehen.

¹Bei [PMTTC03] wird außerdem zwischen deterministischen und statistischen Verfahren unterschieden.

In [SCE04] wird ein Verfahren zur Detektion von Schlagschattenregionen in einzelnen Farbbildern oder Videosequenzen vorgestellt. Es wird angenommen, dass sich das ambiente und das direkte Licht nur in der Intensität unterscheiden. Zunächst wird ein Kantenbild berechnet. Ein Kantenpixel, an dem der Gradient in allen drei Kanälen die selbe Orientierung hat, wird als potentiell Schattenkantenpixel angesehen. Anschließend wird eine Kantendetektion auf einem invarianten Bild durchgeführt. Bisherige potentielle Schattenkantenpixel, die Kantenpixel im invarianten Bild darstellen, werden verworfen. In [GS03] wird eine Klassifikation von Kanten in Farbbildern in Schatten- oder Geometrieanten (Shadingkanten), Highlight- und Materialkanten anhand invarianter Merkmale durchgeführt. Dabei wird vereinfachend von weißer Beleuchtung ausgegangen. In [GDB⁺99] wird unter der Annahme einer Lambert'schen Szene und uniformer Beleuchtung durch eine farbige Lichtquelle, eine invariante Darstellung berechnet, um Materialkanten zu detektieren. Ebenfalls unter der Annahme matter Szenen werden in [GJT86] Farbbildkanten in Material- und Schattenkanten unterschieden. Im Gegensatz zu vielen anderen Verfahren werden dabei für das ambiente Licht nicht die selben spektralen Eigenschaften angenommen, wie für das direkte Licht. Allerdings wird als Eingabe eine Schätzung der Intensität der ambienten Beleuchtung erwartet.

In [BF00] werden Schattenkanten im Farbbild durch die Untersuchung von Farbverhältnissen detektiert. Auf eine Segmentierung folgt eine mehrstufige Analyse der Kanten zwischen den Regionen, um zu entscheiden, ob eine Schatten- oder Materialkante vorliegt. Zunächst wird geprüft, ob das Verhältnis von RGB-Werten über die Kante aus einer Beleuchtungsänderung resultieren kann (basierend auf der Vermessung gängiger Lichtquellen). Unter der Annahme, dass ein Schatten über mehr als eine Fläche in der Szene fällt, wird geprüft, ob das Verhältnis von RGB-Werten über die Kante zwischen verschiedenen Segmentpaaren ähnlich ist. In diesem Fall wird vermutet, dass Schattenkanten vorliegen. Diese Entscheidung wird als sicherer bewertet, wenn die Segmentpaare benachbart sind. Weiche Schattenkanten, die eine Übersegmentierung zwischen zwei Regionen verursachen, werden dabei auch berücksichtigt. Ähnlich wird dieser Ansatz, Farbverhältnisse von Segmentpaaren zu vergleichen, auch in [FTK04] verfolgt.

Geometrische Eigenschaften werden bei der Schattendetektion selten untersucht. Die Verfahren sind zudem meist mit starken Einschränkungen verbunden, indem z. B. von geome-

trisch einfachen Szenen ausgegangen wird [JW94], oder manuelle Einflussnahme, wie die Segmentierung des Schattens im ersten Frame [PN01], erforderlich ist.

Schattenentfernung In [XQJ⁺06] wird zwischen Verfahren zur Entfernung von vagen Schatten und von Schlagschatten unterschieden. Mit vagen Schatten sind dabei leichte Schatten mit unklar definierter Schattengrenze, z. B. Selbstschatten gemeint, die lokal nur leicht schwankende Beleuchtungsänderungen darstellen. In Abschnitt 2.3 wurde bereits erwähnt, dass leichte Schwankungen in der Beleuchtung durch Retinex [LM71] oder Lightness Algorithmen [Hor74, Bla83] eliminiert werden können. Der ursprüngliche Retinex-Algorithmus und Variationen werden in Kapitel 5 genauer betrachtet, die Idee der Lightness Algorithmen wird hier kurz erläutert, da diese auch für die Entfernung von Schlagschatten angepasst wurden.

Lightness Algorithmen berechnen aus einem Farbbild ein intrinsisches Lightness-Bild. Die Grundannahmen sind das vereinfachte Modell der Bildentstehung (Abschnitt 2.2, Gleichung 2.3) und die Annahme, dass leichte Intensitätsschwankungen in den Kanälen des Farbbilds aus Beleuchtungsänderungen und starke Intensitätssprünge aus Änderungen in der Reflektanz resultieren. Zunächst werden für jeden Kanal die logarithmierten Werte und dann deren Ableitungen berechnet. Auf die Ableitungen wird eine Schwellwertfunktion angewendet, die kleine Gradienten auf Null setzt. So sollen nur noch Gradienten beibehalten werden, die Reflektanzänderungen entsprechen. Das logarithmische Lightness-Bild für jeden Kanal wird durch die Reintegration des veränderten Gradientenbilds berechnet. Die drei exponentierten Lightness-Bilder ergeben das farbige Lightness-Bild. Für die zu verwendende Ableitungsfunktion und Reintegration werden verschiedene Verfahren vorgeschlagen [Hor74, Bla83]. Die Wahl des Schwellwerts zur Eliminierung des schwankenden Beleuchtungseinflusses ist schwierig, oft werden auch kleine Änderungen in der Reflektanz entfernt, oder starke Beleuchtungsschwankungen werden beibehalten. Bei der Reintegration können die Werte außerdem nur bis auf eine additive Integrationskonstante rückgerechnet werden. Nach der Exponentierung ergeben sich die reintegrierten Werte also bis auf eine multiplikative Konstante. Diese Abweichungen können durch verschiedene Vorgehensweisen korrigiert werden [Hor74, FHLD06]. [Ebn07, FHLD06]

Die Lightness Verfahren können keine Schlagschatten entfernen, da diese starke Intensitätsänderungen und somit große Gradienten darstellen. Die grundlegende Idee, zunächst ein Gradientenbild, das nur noch Reflektanzkanten enthält, zu berechnen und dieses Gradientenbild zu reintegrieren, wird aber in verschiedenen Verfahren zur Entfernung von Schlagschatten aufgegriffen. Die Verfahren unterscheiden sich dabei in der Berechnung des Reflektanz-Kantenbilds und in der Reintegrationsmethode.

Weiss [Wei01] nutzt Bildsequenzen einer statischen Szene mit bewegten Schatten, um daraus ein Kantenbild zu berechnen, das keine Schattenkanten mehr enthält. Für die Sequenz wird daraus ein schattenfreies, intrinsisches Reflektanzbild berechnet. Das Verfahren ist im folgenden Abschnitt genauer beschrieben. In [MNIS04] wird eine Erweiterung des Verfahrens von Weiss vorgeschlagen. Hier wird nicht nur ein Reflektanzbild pro Sequenz, sondern für jedes Bild der Sequenz ein Reflektanzbild berechnet, sodass die Szene nicht auf matte Objekte beschränkt wird. In [TFA05] werden intrinsische Bilder aus einem Farbbild berechnet. Dazu wird eine Klassifikation der Ableitungspixel durchgeführt, in Pixel, die eine Reflektanzänderung oder eine Änderung des Beleuchtungseinflusses darstellen. Um aus dem Reflektanz-Gradientenbild das intrinsische Reflektanzbild zu berechnen, wird die Methode von Weiss [Wei01] verwendet. Zur Klassifikation wird zunächst die Farbinformation berücksichtigt, wobei davon ausgegangen wird, dass Farbänderungen zwischen Pixeln nur durch Änderung in der Reflektanz verursacht werden. Beleuchtung, die in der Farbe schwankt, wird also ausgeschlossen. Außerdem wird anhand einer Menge von Grauwert-Shading-Mustern ein Klassifikator trainiert, welcher entscheidet, ob Änderungen in der Intensität von Pixeln durch Shading- oder Reflektanzänderung verursacht werden. Das Verfahren eignet sich gut, um Shading-Effekte und Selbstschatten zu eliminieren. Schlagschatten können nur entfernt werden, wenn sich direkte und indirekte Lichtquelle nur in der Intensität unterscheiden.

Finlayson et al. haben das Thema der Entfernung von Schlagschatten in Farbbildern in mehreren Beiträgen behandelt [FHD02a, FHLD06, FHD02b, FF05]. Alle Verfahren basieren auf der Detektion von Schattenkanten, wie sie in Kapitel 4 genauer betrachtet wird. In [FHD02a, FHLD06] wird das Gradientenbild berechnet und für alle Pixel, die ein Schattenkantenpixel darstellen, wird der Gradient auf Null gesetzt. Die Reintegration liefert ein schattenfreies Farbbild. In [FHD02b] wird der pfadbasierte Retinex Algorithmus [LM71]



Abbildung 3.1: Originalbild und intrinsisches Reflektanzbild aus [TFA05].

angepasst, um Schlagschatten zu entfernen. Die Umsetzung dieses Verfahrens wird in Kapitel 5 behandelt. In [FF05] werden Hamilton-Pfade² eingesetzt, um die Reflektanz-Kanteninformation zu reintegrieren. Das Verfahren geht aber davon aus, dass Schatten als geschlossene Regionen detektiert werden können.

Die genannten Verfahren sind für verschiedene Anwendungszwecke geeignet. Ein intrinsisches Reflektanzbild enthält laut Definition [BT78] nur noch Reflektanzinformation. Schatten sind in dieser Darstellung somit nicht mehr sichtbar, aber auch Shading-, also Geometrieinformationen, fehlen. Das Verfahren von Tappen et al. [TFA05] ist darauf angelegt Shading-Effekte zu eliminieren, Abbildung 3.1 zeigt, wie die Objekte dadurch flach erscheinen. Ein solches Ergebnis eignet sich gut zur automatischen Weiterverarbeitung, wie z. B. Segmentierung. Im Kontext der Bildverbesserung, sind die Verfahren von Finlayson et al. besser geeignet, da nur Schlagschatten entfernt werden. Beim Verfahren von Weiss werden zwar auch intrinsische Bilder berechnet, aber Shadinginformationen werden hier teilweise beibehalten, wie im folgenden Abschnitt verdeutlicht wird.

3.2 Verfahren von Weiss

Yair Weiss stellt ein Verfahren zur Berechnung intrinsischer Bilder [Wei01] vor. Das Verfahren geht von dem vereinfachten Modell der Bildentstehung aus (Abschnitt 2.2, Gleichung 2.3) und erwartet als Eingabe eine Sequenz von m Bildern $\{f(\mathbf{x}, t)\}, t = 1, \dots, m$, einer statischen Szene, die mit einer stationären Kamera aufgenommen wurden. Die An-

²In der Graphentheorie ist ein Hamilton-Pfad ein Pfad, der jeden Knoten eines ungerichteten Graphen (hier jedes Pixel eines Bildes) genau einmal besucht. [FF05]

gabe des Kanals k wird hier zunächst wie bei Weiss ausgelassen. Für die Beleuchtung wird angenommen, dass diese nicht konstant ist über die Zeit, sodass sich die Beleuchtungsverhältnisse von Frame zu Frame ändern, während die Reflektanz konstant bleibt. Das Bild zum Zeitpunkt t ergibt sich also aus dem Produkt der aktuellen Beleuchtung und der Reflektanz: $f(\mathbf{x}, t) = E(\mathbf{x}, t)\rho(\mathbf{x})$.³ Gesucht sind das Reflektanzbild $\rho(\mathbf{x})$ und m Beleuchtungsbilder $E(\mathbf{x}, t)$. Das Verfahren arbeitet auf logarithmierten Pixelwerten. Mit $f'(\mathbf{x}, t) = \log(f(\mathbf{x}, t))$, $E'(\mathbf{x}, t) = \log(E(\mathbf{x}, t))$ und $\rho'(\mathbf{x}) = \log(\rho(\mathbf{x}))$ stellt ein Pixelwert die Summe von Beleuchtung und Reflektanz dar:

$$f'(\mathbf{x}, t) = E'(\mathbf{x}, t) + \rho'(\mathbf{x}). \quad (3.1)$$

Um das Reflektanzbild zu berechnen, schlägt Weiss das folgende Vorgehen vor: Zunächst werden n Ableitungsfiler auf die Bilder der Sequenz angewendet. Für n Ableitungsfiler $\{h_i\}$, $i = 1, \dots, n$, ergeben sich für jeden Frame $f'(\mathbf{x}, t)$ n Filterergebnisse $o_i(\mathbf{x}, t) = f'(\mathbf{x}, t) \star h_i$, mit Faltungsoperator \star . Sei $\rho'_i(\mathbf{x})$ das mit dem i -ten Filter gefilterte Reflektanzbild: $\rho'_i(\mathbf{x}) = \rho'(\mathbf{x}) \star h_i$. Die Schätzung dieses gefilterten Reflektanzbildes, $\hat{\rho}'_i(\mathbf{x})$, ergibt sich aus dem Median der Filterergebnisse $o_i(\mathbf{x}, t)$ des i -ten Filters mit $t = 1, \dots, m$:

$$\hat{\rho}'_i(\mathbf{x}) = \text{median}_t o_i(\mathbf{x}, t) \quad (3.2)$$

Zu den jeweiligen Ableitungen der Sequenz wird also jeweils der Median über die Zeit berechnet. Jede Median-Ableitung stellt dann eine Schätzung des mit dem jeweiligen Ableitungsfiler gefilterten Reflektanzbildes dar. Abbildung 3.2 veranschaulicht in den ersten drei Zeilen den Zusammenhang. Die Spalte links zeigt die drei Frames der gegebenen Bildsequenz. Die zwei Spalten rechts zeigen die Ergebnisse der Anwendung der ersten Ableitungen in x - und y -Richtung. In der unteren Zeile in den zwei Spalten rechts sind die Median-Kantenbilder für die beiden Ableitungen dargestellt. Da sich die Schattenkanten über die drei Frames bewegen, ergeben sich als Median Kantenbilder, die nur noch Reflektanzkanten und keine Schattenkanten mehr enthalten.

³Gegenüber Gleichung 2.3 werden hier vereinfachend Reflektanz und Beleuchtung für die Pixelposition \mathbf{x} und nicht für den Oberflächenpunkt \mathbf{x}^w , der auf \mathbf{x} abgebildet wird, angegeben.

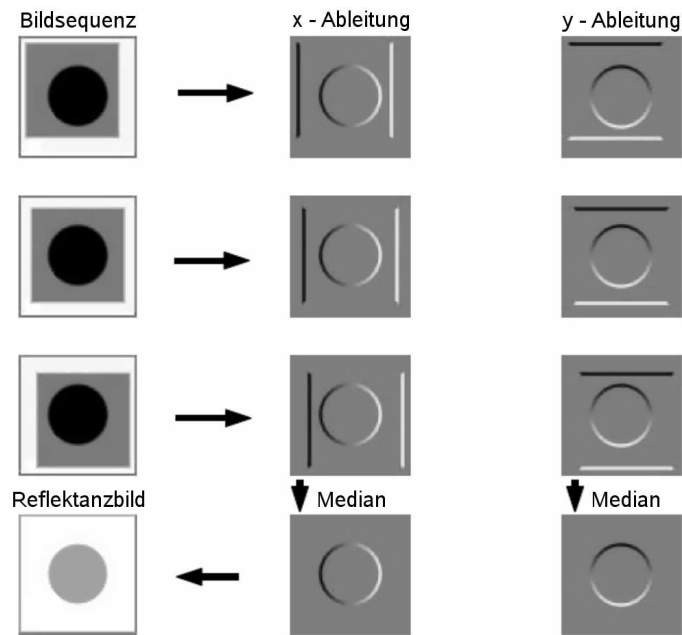


Abbildung 3.2: Veranschaulichung der Berechnung des Reflektanzbildes aus einer Sequenz durch Bilden der Median-Kantenbilder und Reintegration (Abbildung teilweise aus [Wei01]).

Aus den geschätzten Reflektanzkantenbildern $\hat{\rho}'_i(\mathbf{x})$ soll das geschätzte Reflektanzbild $\hat{\rho}'(\mathbf{x})$ rückgerechnet werden. Weiss beschreibt die Lösung wie folgt:

$$\hat{\rho}'(\mathbf{x}) = g \star \left(\sum_{i=1}^n (\hat{\rho}'_i(\mathbf{x}) \star h_i^-) \right), \quad (3.3)$$

mit $h_i(u, v) = h_i^-(-u, -v)$ und der Pseudoinversen g mit $g \star (\sum_{i=1}^n (h_i \star h_i^-)) = \delta$.

Zu diesem Verfahren, ist eine MATLAB-Implementierung von Weiss verfügbar.⁴ In dieser konkreten Umsetzung werden die Bildwerte zu Beginn nicht logarithmiert. Zur Berechnung der Kantenbilder werden die ersten Ableitungen in x- und y-Richtung berechnet. Im Folgenden werden die Ableitungen nicht als Filterung sondern als Anwendung der

⁴<http://www.cs.huji.ac.il/~yweiss/intrinsic.tar> [28.11.07]

Ableitungsoperatoren ∇_x und ∇_y ausgedrückt. Zunächst werden die Ableitungen des geschätzten Reflektanzbilds berechnet durch:

$$\nabla_x \hat{\rho}(\mathbf{x}) = \text{median}_t(\nabla_x f(\mathbf{x}, t)) \quad (3.4)$$

$$\nabla_y \hat{\rho}(\mathbf{x}) = \text{median}_t(\nabla_y f(\mathbf{x}, t)) \quad (3.5)$$

Anschließend werden die Ableitungen der Median-Kantenbilder berechnet und summiert:

$$\nabla^2 \hat{\rho}(\mathbf{x}) = \nabla_x(\text{median}_t(\nabla_x f(\mathbf{x}, t))) + \nabla_y(\text{median}_t(\nabla_y f(\mathbf{x}, t))) \quad (3.6)$$

Dies stellt die so genannte Poisson Gleichung [BS89] dar. Für eine Lösung ist die Definition von Randbedingungen erforderlich. Weiss verwendet Dirichlet-Randbedingungen [FF05], die Bildwerte am Rand werden auf Null gesetzt. Eine Lösung ist, analog zu Gleichung 3.3, durch den inversen Laplace Operator gegeben:

$$\hat{\rho}(\mathbf{x}) = (\nabla^2)^{-1}(\nabla_x(\text{median}_t(\nabla_x f(\mathbf{x}, t))) + \nabla_y(\text{median}_t(\nabla_y f(\mathbf{x}, t)))) \quad (3.7)$$

Die Invertierung des Laplace Operators wird durch Überführung in den Frequenzraum, Division mit der Fouriertransformation des Laplace-Filters und anschließende Rücktransformation durch inverse Fouriertransformation gelöst. Ähnlich wird auch in [FHLD06] verfahren. Hier wird darauf hingewiesen, dass die Bildwerte nur bis auf eine additive Integrationskonstante rekonstruiert werden können. Abschließend werden die Ergebniswerte linear auf den darstellbaren Bereich skaliert.

Die MATLAB-Implementierung von Weiss erzeugt und verarbeitet zur Demonstration des Verfahrens synthetische Grauwertbilder. Der Code wurde von Detlev Droege so angepasst, dass Grauwertbildsequenzen eingelesen und verarbeitet werden können. Dieser Code wurde im Rahmen dieser Arbeit weiter modifiziert: Es werden Farbbildsequenzen verarbeitet, indem die erläuterten Rechnungen separat auf jedem der drei Farbkanäle durchgeführt werden. Um nach der Reintegration keinen schwarzen Rand zu erhalten, wird, anstatt die Randpixel vor der Berechnung der Ableitungen auf Null zu setzen, ein Rand von Pixeln mit dem Wert Null hinzugefügt und nach der Reintegration wieder entfernt.

Das Ergebnis des Verfahrens ist stark von der Eingabesequenz abhängig. Schlagschatten können entfernt werden, wenn sich die Schattenkante über die Bildsequenz ausreichend bewegt. Ob Shading Information erhalten bleibt hängt auch davon ab, wie stark sich die Beleuchtungsverhältnisse, konkret der Einfallswinkel der Beleuchtung, ändert.

3.3 Verfahren von Finlayson et al.

Das Datenflussdiagramm in Abbildung 3.3 zeigt die Verfahren von Finlayson et al. zur Schattendetektion [FHD02a] und Schattenentfernung mit dem Retinex [FHD02b] im Überblick, um den Zusammenhang der beteiligten Prozesse und Daten zu verdeutlichen.

Die eigentliche *Schattenentfernung mit dem Retinex* [FHD02b] ist im unteren Teil der Abbildung im grünen Kasten dargestellt. Als Eingabe erwartet das Verfahren ein *Farbbild*, auf dem ein Schlagschatten zu sehen ist, sowie ein binäres *Schattenkantenbild*, das angibt, welche Pixel Schattenkantenpixel darstellen. Das Ergebnis ist ein *schattenfreies Farbbild*, das die Szene des Eingabebilds ohne Schatten zeigt.

Zur *Schattenkantendetektion* wird auf ein Verfahren von Finlayson et al. [FHD02a] verwiesen. Die zugehörigen Prozesse sind blau umrandet dargestellt. Zunächst erfolgt die *Berechnung der invarianten Darstellung* [FH01]. Die eindimensionalen, invarianten Werte sind nur abhängig von der Reflektanz der abgebildeten Oberflächenpunkte, sodass Schatten in der Darstellung als *invariantes Grauwertbild* nicht mehr sichtbar sind. Im Prozessschritt *Vergleich der Kantenbilder* werden vom Eingabefarbbild und vom invarianten Bild Kantenbilder erzeugt. Schattenkanten sind Kanten, die im Kantenbild des Farbbilds auftreten, aber nicht im Kantenbild des invarianten Bilds.

Um die beleuchtungsinvariante Darstellung berechnen zu können, wird die so genannte *invariante Richtung* benötigt. Diese ist abhängig von der verwendeten Kamera. Um diese Kameraeigenschaft zu bestimmen, schlagen Finlayson et al. [FHD02a] eine *Kamerakalibrierung* mit Hilfe mehrerer *ColorChecker[®] Aufnahmen* vor. Alternativ kann die invariante Richtung durch *Entropieminimierung* [FDL04] bestimmt werden, wobei als Eingabe nur das Farbbild mit Schatten benötigt wird.

Das Verfahren zur Schattenkantendetektion, sowie dessen Umsetzung und Anpassungen werden im folgenden Kapitel 4 erläutert. Die eigentliche Schattenentfernung mit dem Retinex-Algorithmus wird in Kapitel 5 behandelt.

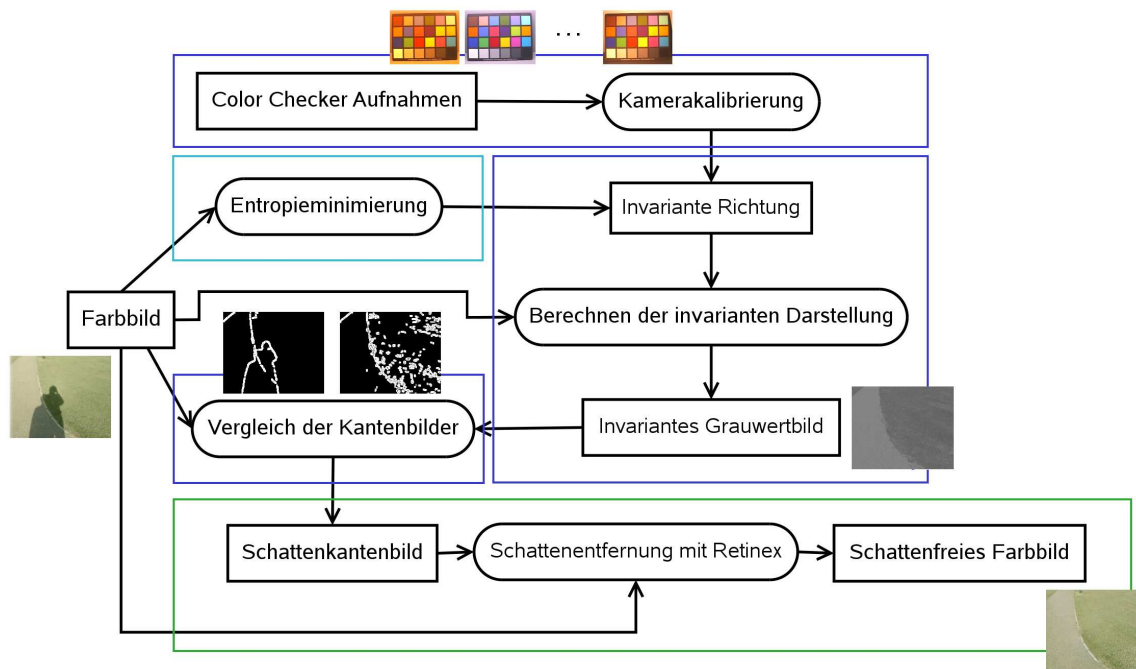


Abbildung 3.3: Diagramm zur Veranschaulichung der bei den Verfahren zur Schatten-detektion [FHD02a] und Schattenentfernung [FHD02b] beteiligten Prozesse und Daten (Teile der Abbildung aus [FHD02a]).

Kapitel 4

Detektion der Schattenkanten

In diesem Kapitel werden das Verfahren zur Detektion von Schattenkanten nach Finlayson et al. [FHD02a] und die eigene Umsetzung erläutert. Abschnitt 4.1 behandelt zunächst die Herleitung der invarianten Darstellung. In Abschnitt 4.2 werden Verfahren zur Bestimmung der invarianten Richtung vorgestellt. Der umgesetzte Algorithmus zur Schatten-detektion wird in Abschnitt 4.3 präsentiert. Abschließend werden Einschränkungen des Verfahrens untersucht.

4.1 Beleuchtungsinvariante Darstellung

Das Verfahren zur Berechnung der beleuchtungsinvarianten Darstellung eines Farbbilds [FH01] geht von dem in Abschnitt 2.2 beschriebenen, vereinfachten Bildentstehungsmodell aus. Folgende Rechnungen ([FH01, Ebn07]) beziehen sich immer auf eine bestimmte Pixelposition, der Wert eines Pixels im Kanal k mit $k \in \{r, g, b\}$ ist also

$$f^{(k)} = E(\lambda_k)\rho(\lambda_k). \quad (4.1)$$

Es wird angenommen, dass die Beleuchtung der Szene als Planck'scher Strahler approximiert werden kann. Die Approximation der Beleuchtung mit der Intensität I und Farbtem-

peratur T durch Wiens Approximation des Planck'schen Gesetz (Formel 2.7) ergibt für den Wert des betrachteten Pixels

$$f^{(k)} = I c_1 \lambda_k^{-5} e^{-\frac{c_2}{T \lambda_k}} \rho(\lambda_k). \quad (4.2)$$

Die Anwendung des natürlichen Logarithmus \ln auf die gesamte Gleichung ergibt

$$\ln(f^{(k)}) = \ln(I) + \ln(c_1 \lambda_k^{-5} \rho(\lambda_k)) - \frac{c_2}{T \lambda_k}. \quad (4.3)$$

Anschließend werden Log-Chromatizitäts-Werte gebildet. Dies sind logarithmische Kanalverhältnisse, also die Differenzen der logarithmischen Kanalwerte. Dazu wählt man einen bestimmten Kanal, hier z. B. Grün, und bildet die Differenzen zwischen den beiden übrigen logarithmischen Kanalwerten und dem gewählten logarithmischen Kanalwert. Es ergeben sich mit $i \in \{r, b\}$ zwei Komponenten

$$\chi_{ig} = \ln(f^{(i)}) - \ln(f^{(g)}) \quad (4.4)$$

$$= (\ln(I) + \ln(c_1 \lambda_i^{-5} \rho(\lambda_i)) - \frac{c_2}{T \lambda_i}) - (\ln(I) + \ln(c_1 \lambda_g^{-5} \rho(\lambda_g)) - \frac{c_2}{T \lambda_g}) \quad (4.5)$$

$$= \ln(c_1 \lambda_i^{-5} \rho(\lambda_i)) - \frac{c_2}{T \lambda_i} - \ln(c_1 \lambda_g^{-5} \rho(\lambda_g)) + \frac{c_2}{T \lambda_g}. \quad (4.6)$$

Die Log-Chromatizitäts-Werte χ_{ig} sind unabhängig von der Intensität der Beleuchtung am abgebildeten Oberflächenpunkt. Es besteht aber noch die Abhängigkeit von der Farbtemperatur T der Beleuchtung.

Die Substitutionen $\rho'_j = c_1 \lambda_j^{-5} \rho(\lambda_j)$ und $A_j = \frac{-c_2}{\lambda_j}$ (mit j beliebig) führen zu einer vereinfachten Darstellung der Log-Chromatizitäts-Werte:

$$\chi_{ig} = \ln\left(\frac{\rho'_i}{\rho'_g}\right) + \frac{1}{T}(A_i - A_g), \quad \text{mit } i \in \{r, b\}. \quad (4.7)$$

Die χ_{ig} -Komponenten stellen einen 2-D Vektor $\boldsymbol{\chi} = (\chi_{rg}, \chi_{bg})^T$ dar. Mit der Temperatur T als Parameter ist der Vektor durch eine Gerade mit Aufpunkt $\boldsymbol{u} = \left(\ln\left(\frac{\rho'_r}{\rho'_g}\right), \ln\left(\frac{\rho'_b}{\rho'_g}\right)\right)^T$ und Richtungsvektor $\boldsymbol{v} = (A_r - A_g, A_b - A_g)^T$ definiert:

$$\boldsymbol{\chi} = \boldsymbol{u} + \frac{1}{T} \boldsymbol{v}. \quad (4.8)$$

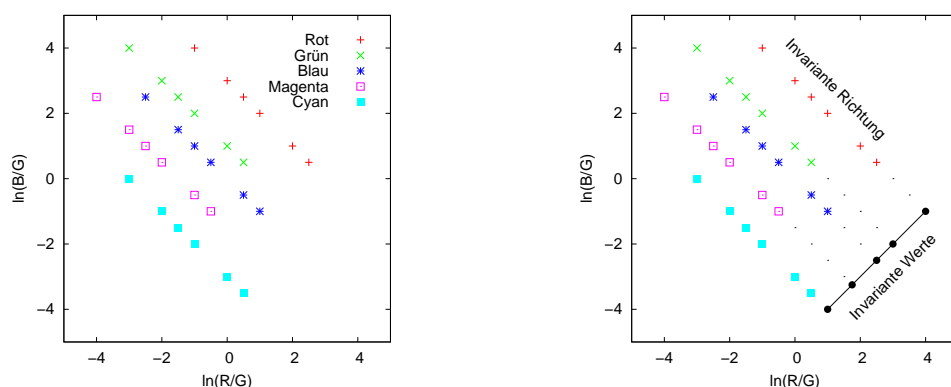


Abbildung 4.1: Links: Log-Chromatizitäts-Koordinaten, die sich aus der Abbildung von 5 verschieden farbigen Punkten unter 6 verschiedenen Beleuchtungen ergeben, rechts: Projektion entlang der invarianten Richtung ergibt invariante Werte.

Der Aufpunkt u ist dabei nur abhängig von der Reflektanz $\rho(\lambda_k)$ des abgebildeten Oberflächenpunktes und den fest definierten Wellenlängen λ_k , auf die die Kamerasensoren reagieren. Diese sind für eine bestimmte Kamera konstant. Der Richtungsvektor v ist nur von diesen Wellenlängen abhängig, für eine bestimmte Kamera also konstant.

Logarithmische Chromatizitätswerte, die Oberflächenpunkte derselben Reflektanz unter verschiedener Beleuchtung darstellen, liegen im Log-Chromatizitäts-Raum also auf einer Geraden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 4.1 links beispielhaft veranschaulicht. Dargestellt sind die Log-Chromatizitäts-Koordinaten, die sich aus der Abbildung von fünf verschieden farbigen Oberflächenpunkten ergeben, die nacheinander durch einen von sechs Planck'schen Strahlern verschiedener Farbtemperaturen beleuchtet wurden. Für jeden Oberflächenpunkt bilden die Koordinaten eine Gerade. Der Ort einer Geraden ist durch die Reflektanz des abgebildeten Oberflächenpunkts bestimmt. Die jeweilige Position auf der Geraden ist nur abhängig von der Farbtemperatur T der Beleuchtung am abgebildeten Punkt. Die Geraden sind parallel und ihre Richtung ist durch die verwendeten Kamerasensoren bestimmt. Finlayson et al. [FHD02a] nennen diese Richtung die *invariant log lighting direction*, im Folgenden *beleuchtungsinvariante* oder kurz *invariante Richtung*.

Eine Darstellung, die unabhängig ist von der Temperatur T , erhält man durch die Projektion der Datenpunkte entlang der beleuchtungsinvarianten Richtung, definiert durch Rich-

tungsvektor v , auf den orthogonalen Vektor v^\perp (Abbildung 4.1, rechts). Der orthogonale Vektor kann beschrieben werden durch $(\Lambda_b - \Lambda_g, -(\Lambda_r - \Lambda_g))^T$. Die projizierte Koordinate g wird berechnet durch das Skalarprodukt

$$g = \chi \cdot v^\perp = (\Lambda_b - \Lambda_g) \ln\left(\frac{\rho'_r}{\rho'_g}\right) - (\Lambda_r - \Lambda_g) \ln\left(\frac{\rho'_b}{\rho'_g}\right). \quad (4.9)$$

Der skalare beleuchtungsinvariante Wert g ist nur abhängig von der Reflektanz des abgebildeten Oberflächenpunkts und unabhängig von Intensität und Farbtemperatur der Beleuchtung.¹

Die Orientierung des orthogonalen Vektors ist für die Berechnung der invarianten Werte nicht relevant.² In der konkreten Umsetzung in dieser Arbeit wird daher die Richtung, auf die projiziert wird, mit Hilfe des Winkels α ausgedrückt. Der Winkel α ist der positiv orientierte Winkel zwischen der ersten Achse im Log-Chromatizitäts-Raum und dem Vektor v^\perp . Die möglichen Richtungen können durch α mit $\alpha \in [0, \dots, 180[$ ausreichend beschrieben werden. Die projizierte Koordinate g berechnet sich dann durch

$$g = \chi_{rg} \cos(\alpha) + \chi_{bg} \sin(\alpha). \quad (4.10)$$

Der Winkel α wird im Folgenden auch als *invarianter Winkel* bezeichnet. Dessen Bestimmung wird in Abschnitt 4.2 erläutert.

4.1.1 Verwendung des Geometric Mean 2-D Chromatizitäts-Raums

Bei der Berechnung der Log-Chromatizitäts-Werte (Gleichung 4.4) stellt sich die Frage, welcher Kanal zur Bildung der Differenzen der logarithmischen Kanalwerte zu wählen ist. Wenn der gewählte Kanal sehr kleine Werte besitzt, ergeben sich verrauschte Werte [Ebn07]. In dieser Arbeit wurde daher eine Variante von Finlayson et al. [FDL04] umge-

¹Implizit wird hier ohne Verlust der Allgemeingültigkeit angenommen, dass der Vektor v^\perp normiert ist. Wäre dies nicht der Fall, würde sich dieselbe Darstellung unabhängig von T ergeben, multipliziert mit dem Betrag des Vektors v^\perp .

² v^\perp kann auch durch $(-(\Lambda_b - \Lambda_g), (\Lambda_r - \Lambda_g))^T$ beschrieben werden, in diesem Fall ergibt sich der invariante Wert $-g$.

setzt, bei der kein bestimmter Kanal gewählt werden muss.³ Dabei wird die Differenz zum natürlichen Logarithmus des Geometric Mean $\mu = \sqrt[3]{f^{(r)} f^{(g)} f^{(b)}}$ berechnet, um Werte zu erhalten, die unabhängig sind von der Intensität der Beleuchtung. Anstelle der zwei Komponenten in Gleichung 4.4 ergeben sich 3 Komponenten

$$\chi'_k = \ln(f^{(k)}) - \ln(\mu) \quad (4.11)$$

mit $k \in \{r, g, b\}$. Analog zu Gleichung 4.8 ergibt sich (s. Herleitung im Anhang A) die Darstellung einer Geraden im dreidimensionalen Raum mit Parameter T und denselben Eigenschaften für Aufpunkt und Richtungsvektor:

$$\boldsymbol{\chi}' = \mathbf{u}' + \frac{1}{T} \mathbf{v}'. \quad (4.12)$$

Die Ortsvektoren⁴ $\boldsymbol{\chi}'$ sind orthogonal zum Vektor $\mathbf{a} = \frac{1}{\sqrt{3}}(1, 1, 1)^T$, da $\boldsymbol{\chi}' \cdot \mathbf{a} = 0$ [FDL04]. Somit befinden sich alle Vektoren $\boldsymbol{\chi}'$ in einer Ebene durch den Ursprung, orthogonal zu \mathbf{a} , und können durch zwei Dimensionen ausreichend beschrieben werden [FDL04, Ebn07]. Mit der Matrix \mathbf{A} (s. Anhang A) werden die 3-D Vektoren $\boldsymbol{\chi}'$ in 2-D Vektoren $\boldsymbol{\chi}$ in einem Standardkoordinatensystem, das den so genannten Geometric Mean 2-D Chromatizitäts-Raum [FDL04] in der Ebene definiert, transformiert [Ebn07]:

$$\boldsymbol{\chi} = \begin{pmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \end{pmatrix} = \mathbf{A}^T \boldsymbol{\chi}'. \quad (4.13)$$

Die lineare Transformation erhält die Eigenschaft, dass die Vektoren $\boldsymbol{\chi}$ durch Punkte auf parallelen Geraden definiert werden.

Die beleuchtungsinvarianten Werte g werden analog zu Gleichung 4.10 berechnet durch

$$g = \boldsymbol{\chi} \cdot \mathbf{v}^\perp = \chi_1 \cos(\alpha) + \chi_2 \sin(\alpha), \quad (4.14)$$

mit $\alpha \in [0, \dots, 180[$ und \mathbf{v}^\perp orthogonal zum Vektor $\mathbf{v} = \mathbf{A}^T \mathbf{v}'$.

³Zur Erläuterung der Berechnung der invarianten Werte wurde im vorigen Abschnitt das originale Verfahren [FH01] vorgestellt, da eine Veranschaulichung mit der im Folgenden beschriebenen Variante schwierig ist. Hier werden daher auch nur die wichtigsten Gleichungen aufgeführt, die ausführlichen Rechnungen befinden sich in Anhang A.

⁴Ortsvektoren gehen per Definition durch den Ursprung. [Bar04]

4.1.2 Informationsverlust

Im Kontext der Schattendetektion wird die invariante Darstellung eingesetzt um die Materialkanten in der Szene, also Kanten zwischen Flächen mit unterschiedlichen Reflexionseigenschaften zu detektieren. Durch die Projektion entlang der invarianten Richtung kann aber Information darüber, ob sich Flächen in ihrer Reflexionseigenschaft unterscheiden, verloren gehen [FHL06]: Wenn sich die Reflektanz zweier Oberflächenpunkte nur in der Intensität unterscheidet, z. B. bei achromatischen Flächen, werden diese auf dieselbe Gerade im Log-Chromatizitäts-Raum und somit auf denselben invarianten Wert abgebildet. Aber auch Reflektanzen unterschiedlicher Chromatizität können nicht mehr unterschieden werden, wenn die zugehörigen Log-Chromatizitäts-Koordinaten auf derselben Gerade entlang der invarianten Richtung liegen. Somit können also auch Materialkanten in der invarianten Darstellung fehlen und fälschlicherweise als Schattenkante klassifiziert werden. Auf diese Problematik wird in Abschnitt 4.3 genauer eingegangen.

4.1.3 Umgang mit nicht erfüllten Annahmen

Das dem Verfahren zugrunde liegende Bildentstehungsmodell erwartet Linearität der Pixelwerte und Schmalbandigkeit der Sensoren der verwendeten Kamera. Um die Linearität der Pixelwerte zu gewährleisten, empfehlen Finlayson et al. [FHD02a, FHL06] kamerainterne Verarbeitungen der Sensorantworten zu deaktivieren. In [FHD02a] wird gezeigt, dass der lineare Zusammenhang der Log-Chromatizitäts-Werte bei Beleuchtungsänderung auch erfüllt ist, wenn eine Gamma-Korrektur der Sensorantworten durchgeführt wird. Bei der Kalibrierung der invarianten Richtung sollte aber darauf geachtet werden, dass die gleichen Kameraeinstellungen verwendet werden, wie bei der Aufnahme der zu verarbeitenden Bilder [DCHF02]. Die Forderung der perfekten Schmalbandigkeit der Sensorempfindlichkeitskurven wird von üblichen Kameras nicht erfüllt. In der Praxis wird aber davon ausgegangen [FH01], dass die Sensoren entweder annähernd schmalbandig genug sind, oder diese Bedingung durch eine Spectral Sharpening Transformation [FDF94] erfüllt werden kann. Im Zusammenhang mit der Berechnung invarianter Bilder werden dazu mehrere Verfahren vorgeschlagen [DCHF02, FLD05]. Die Umsetzung einer Spectral Sharpening Transformation war in dieser Arbeit nicht erforderlich, da der lineare Zusammen-

hang der Log-Chromatizitäts-Werte bei den verwendeten Kameras ausreichend gegeben ist (s. Abschnitt 7.2).

4.2 Bestimmung der Invarianten Richtung

Zur Bestimmung der invarianten Richtung oder des invarianten Winkels einer Kamera sind zwei alternative Verfahren bekannt [FHD02a, FDL04]. Der Vorteil der in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Entropieminimierung ist, dass die invariante Richtung dabei direkt aus dem vorliegenden Farbbild, dessen invariante Darstellung gesucht ist, berechnet wird. Die Durchführung einer Kamerakalibrierung (Abschnitt 4.2.2) erfordert dagegen die Aufnahme und Auswertung mehrerer Kameraaufnahmen unter bestimmten Bedingungen und somit erheblich mehr Aufwand. In dieser Arbeit wurde daher zunächst das Verfahren der Entropieminimierung umgesetzt. Der Einsatz des Verfahrens führt bei den Bildern der Netzwerkkamera zu keinen brauchbaren Ergebnissen (s. Abschnitt 7.2.1), daher wurde zusätzlich eine Kalibrierung durchgeführt. Der Vorteil bei der Kalibrierung besteht darin, dass dabei auch festgestellt werden kann, ob die Kamera überhaupt für das Verfahren geeignet ist. Daher wurde auch die Kamera, die für die Laborexperimente eingesetzt wurde, kalibriert.

4.2.1 Entropieminimierung

Das Verfahren [FDL04] benötigt als Eingabe nur das Farbbild, auf dem Schatten zu sehen sind. Gesucht ist der invariante Winkel α . Die Idee des Verfahrens wird anhand von Abbildung 4.2 veranschaulicht. Gezeigt sind die Punkte im Geometric Mean 2-D Chromatizitäts-Raum zu Pixelwerten von Oberflächenpunkten gleicher Reflektanz, die annähernd entlang paralleler Geraden ausgerichtet sind. Links werden die Punkte entlang der korrekten invarianten Richtung und rechts entlang einer falschen Richtung projiziert. Im ersten Fall weisen die invarianten Werte eine Ordnung auf, ihre Entropie ist gering. Der zweite Fall führt dagegen zu einer großen Streuung der invarianten Werte, und somit zu einer größeren Entropie. Die Idee ist daher: Der Winkel, aus dem ein invariantes Bild mit minimaler Entropie hervorgeht, ist der gesuchte [FDL04]. Nach Finlayson et al. [FDL04] besteht die-

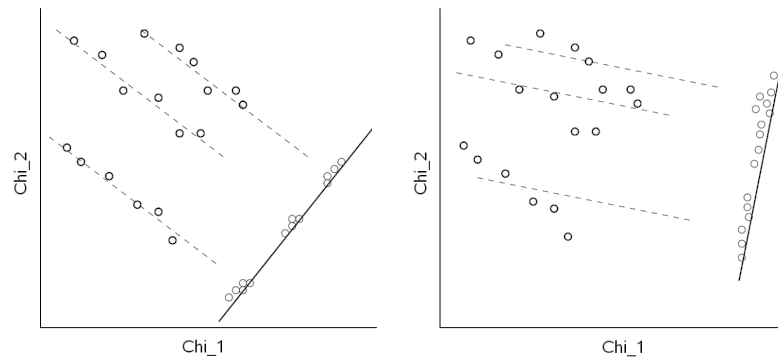


Abbildung 4.2: Punkte gleicher Reflektanz, die im Geometric Mean 2-D Chromatizitäts-Raum annähernd entlang paralleler Geraden ausgerichtet sind. Links: Projektion der Punkte entlang der korrekten invarianten Richtung. Rechts: Projektion entlang einer falschen Richtung (Abbildung teilweise übernommen aus [FDL04]).

ser Zusammenhang auch bei natürlichen Bildern mit Schattenbereichen, da hier durch die Bereiche im Innern und außerhalb des Schattens unterschiedliche Beleuchtungssituationen gegeben sind. Bei Experimenten mit einer Reihe von natürlichen Bildern erhalten sie ähnliche Winkel, wie bei der Bestimmung des Winkels durch eine Kalibrierung. Außerdem stellt das Minimum der Entropiewerte ein globales Minimum dar. Die Ergebnisse der Autoren lassen vermuten, dass das Verfahren der Entropieminimierung eine gute Alternative darstellt, wenn keine Kalibrierung der Kamera möglich ist.

Das Struktogramm in Abbildung 4.3 beschreibt den in der Arbeit umgesetzten Algorithmus nach [FDL04] zur Berechnung des invarianten Winkels α durch Entropieminimierung. Zu dem gegebenen Farbbild wird zunächst die zweidimensionale Geometric Mean 2-D Chromatizitäts-Darstellung berechnet. Für jeden möglichen Winkel $\alpha \in [0, \dots, 180[$ wird das invariante Bild berechnet. Durch lineare Skalierung der invarianten Pixelwerte auf den diskreten Wertebereich $[0, 255]$ wird das invariante Grauwertbild erzeugt. Zu diesem Grauwertbild wird ein Histogramm erstellt, wobei die Größe w der Histogramm-Bins durch die Regel nach Scott bestimmt wird [FDL04]:

$$w = 3.5\sigma n^{-\frac{1}{3}}, \quad (4.15)$$

Eingabe: Farbbild f mit Schatten
Berechne Geometric Mean 2-D Chromatizitäts-Darstellung f_χ des Farbbildes
FOR jeden Winkel $\alpha \in [0, \dots, 180[$
Berechne invariantes Bild g mit $g(\mathbf{x}) = f_\chi^{(1)}(\mathbf{x})\cos(\alpha) + f_\chi^{(2)}(\mathbf{x})\sin(\alpha)$
Berechne invariantes Grauwertbild g_s durch lineare Skalierung von g auf $[0, 255]$
Berechne Histogramm Bin Größe und daraus Anzahl m der Bins
Berechne Histogramm des Grauwertbilds g_s
Berechne Entropie $\eta(\alpha) = -\sum_{b=1}^m p_\alpha(b) \log_2(p_\alpha(b))$
$\alpha_{\min} = \operatorname{argmin}_\alpha \eta(\alpha)$
Ausgabe: Winkel α_{\min}

Abbildung 4.3: Struktogramm zur Entropieminimierung.

mit der Standardabweichung σ der invarianten Grauwerte und der Anzahl n der Pixel. Anschließend wird die Entropie η der invarianten Grauwerte berechnet durch

$$\eta(\alpha) = -\sum_{b=1}^m p_\alpha(b) \log_2(p_\alpha(b)). \quad (4.16)$$

Dabei ist m die Anzahl der Histogramm-Bins und $p_\alpha(b)$ die Wahrscheinlichkeit, dass ein Grauwert aus dem Bin b im Bild, das sich aus dem Winkel α ergibt, vorkommt. Der gesuchte Winkel α_{\min} ist schließlich der Winkel, der die kleinste Entropie verursacht.

Für die eigene Umsetzung des Verfahrens in C++ wurde eine Laufzeit von etwa 7,9 Sekunden (s. Tabelle 7.7) ermittelt. Wenn die Kamera, mit der die zu bearbeitenden Bilder aufgenommen wurden, verfügbar ist, sollte der invariante Winkel daher durch eine Kalibrierung bestimmt werden.

4.2.2 Kamerakalibrierung

Für die Kalibrierung einer bestimmten Kamera werden mehrere Aufnahmen eines Kalibrieremusters mit verschieden farbigen Flächen, z. B. des Macbeth ColorChecker[®], benötigt [FHD02a]. Bei jeder Aufnahme wird die Beleuchtung gewechselt, indem eine Lichtquelle einer anderen korrelierten Farbtemperatur verwendet wird. Die (x,y)-Chromatizitäts-

koordinaten der Lichtquelle sollten nahe des Planck'schen Orts liegen. Bei den Aufnahmen sollten außerdem die gleichen Kameraeinstellungen gewählt werden wie bei der Aufnahme der Bilder, deren invariante Darstellung gesucht ist (s. Abschnitt 4.1.3).

Anhand der Aufnahmen werden die invariante Richtung und der invariante Winkel wie im Folgenden beschrieben, bestimmt [Ebn07]. Gegeben seien m Bilder und n verschiedene Farbfelder. Für jedes Bild f_i , $i = 1, \dots, m$, wird für jedes Farbfeld j , $j = 1, \dots, n$, der RGB-Mittelwert und dessen Punkt $\chi_{i,j}$ im Log-Chromatizitäts-Raum berechnet. Dabei muss derselbe Log-Chromatizitäts-Raum gewählt werden, der zur Berechnung der invarianten Darstellung verwendet wird. In dieser Arbeit wird wie beschrieben der Geometric Mean 2-D Chromatizitäts-Raum eingesetzt. Die Punkte, die zu einem Farbfeld gehören, sollten annähernd auf einer Geraden liegen (s. Abbildung 4.4, links).⁵ Für jedes Farbfeld j wird der Mittelwert $\bar{\chi}_j$ der zugehörigen Punkte berechnet:

$$\bar{\chi}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \chi_{i,j} \quad (4.17)$$

Um die Gerade, entlang derer sich die Punkte $\chi_{i,j}$ eines Farbfelds j orientieren, in den Ursprung zur verschieben, wird der Mittelwert von den Punkten des Farbfelds subtrahiert. Es ergeben sich die Punkte $\chi'_{i,j}$ mit

$$\chi'_{i,j} = \chi_{i,j} - \bar{\chi}_j \quad (4.18)$$

Die Punkte $\chi'_{i,j}$ liegen alle entlang einer Geraden durch den Ursprung (s. Abbildung 4.4, rechts). Die beleuchtungsinvariante Richtung \mathbf{v} ergibt sich aus dem Richtungsvektor der Geraden, die diese Punkte am besten approximiert. Zur Bestimmung dieser Geraden wird bei der in dieser Arbeit implementierten Kalibrierung eine zweidimensionale Geradenanpassung durch Orthogonal Distance Regression Fitting [AV05] eingesetzt. Dabei wird für die Menge der Punkte die Gerade bestimmt, die die Summe der quadratischen Abstände der Punkte zur Geraden minimiert. Dabei konnte ich auf eine Implementierung zurückgreifen, die ich im Rahmen meiner Studienarbeit [Ste06] entwickelt habe. Zur Berechnung des invarianten Winkels α wird zunächst der orientierte Winkel β mit $\beta \in [-90, 90[$ zwischen

⁵Diese Eigenschaft ist nur gegeben, wenn die Annahmen des Verfahrens zur Berechnung der invarianten Darstellung ausreichend erfüllt sind.

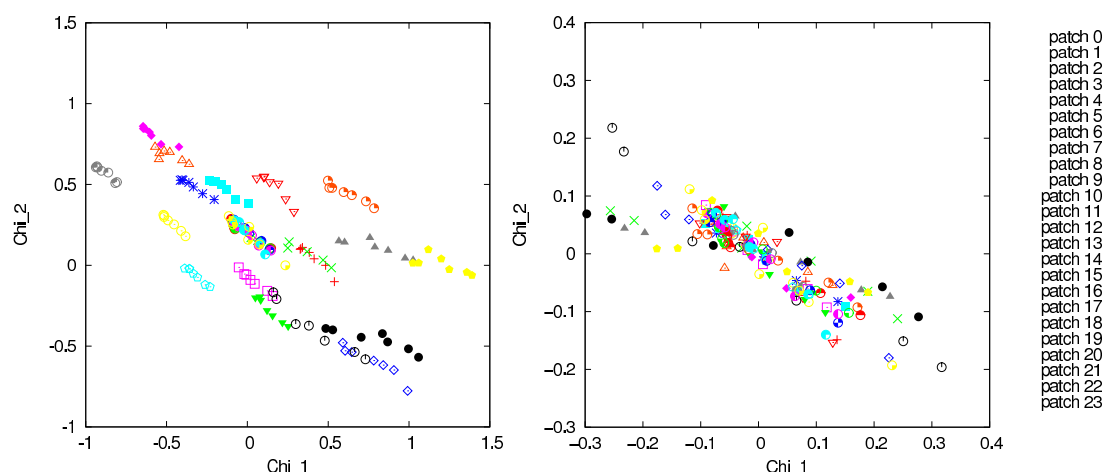


Abbildung 4.4: Beispiel einer Kalibrierung mit dem Macbeth ColorChecker[®] und sieben verschiedenen Beleuchtungen. Die Farbfelder werden, wie in Abbildung 4.5 links dargestellt, zeilenweise von links oben nach rechts unten gezählt. Links: Die Koordinaten, die zu einem Farbfeld gehören, liegen annähernd auf parallelen Geraden. Rechts: In den Ursprung verschobene Geraden.

dem Vektor $\mathbf{v} = (v_x, v_y)^T$ und der ersten Achse im Geometric Mean 2-D Chromatizitäts-Raum berechnet:

$$\beta = \begin{cases} -90, & \text{für } v_x = 0 \\ \arctan\left(\frac{v_y}{v_x}\right), & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.19)$$

Der Winkel $\alpha \in [0, 180[$ wird berechnet durch

$$\alpha = \beta + 90. \quad (4.20)$$

Als Kalibriermuster wird in dieser Arbeit der Macbeth ColorChecker[®] mit 24 Farbfeldern verwendet (s. Abbildung 4.5, links). Um für jede Kalibrieraufnahme die Mittelwerte der Farbfelder bestimmen zu können, müssen die Pixel, die zum jeweiligen Farbfeld gehören, selektiert werden. Hierzu wurde eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) erstellt. Mit dieser können die Kalibrieraufnahmen geladen werden, um Bereiche in den Farbfeldern auszuwählen, die das entwickelte Programm zur Kalibrierung dann zur Bestimmung der

Mittelwerte verwendet. In Anhang E werden die technische Umsetzung der GUI und der Kalibrierung, sowie die Bedienung der grafischen Oberfläche erläutert.

Zur Erstellung der Kalibrieraufnahmen verwenden Finlayson et al. [FHD02a] 14 Bilder des ColorChecker[®], die zu verschiedenen Tageszeiten im Freien aufgenommen wurden. Die verschiedenen Tageslichtphasen (z. B. sonnig, wolkig, Sonnenauf-, -untergang) liefern Spektren verschiedener korrelierter Farbtemperaturen. Die in dieser Arbeit eingesetzten Kameras sind für einen Außeneinsatz nicht geeignet. Beide benötigen eine Stromversorgung, sowie einen Netzwerk- beziehungsweise Firewireanschluss zur Bildaufnahme. In dieser Arbeit wurde die Kalibrierung daher im Labor, unter Verwendung künstlicher Lichtquellen, realisiert.

Kamerakalibrierung unter Verwendung künstlicher Lichtquellen Für die Kalibrierung wurden mehrere Lichtquellen benötigt, die verschiedene korrelierte Farbtemperaturen besitzen und deren (x,y)-Chromatizitätskoordinaten dem Planck'schen Ort möglichst nahe liegen. Um diese Anforderungen zu prüfen, wurden verschiedene Lichtquellen mit einem Beleuchtungsstärkemessgerät (Minolta Chroma Meter CL-200), das an der Position des ColorChecker[®] platziert wurde, vermessen. Das Gerät liefert neben der Beleuchtungsstärke die (x,y)-Chromatizitätskoordinaten. Die Messung wurde mit den folgenden Lichtquellen durchgeführt: Aus der Just Pantone Color Viewing Light Box die CIE Standardlichtarten A, D65 und die Lichtart TL84,⁶ ein Halogenstrahler von 100 und 400 Watt und eine Kohlebogenlampe. Außerdem wurde eine 100 Watt Glühbirne mit einem Dimmer geregelt, um so verschiedene Farbtemperaturen zu erzeugen. Bei den Aufnahmen wurde darauf geachtet, dass der Raum völlig abgedunkelt ist, sodass die Kamera bei ausgeschalteter Lichtquelle keine Antwort liefert. Abbildung 4.5, rechts zeigt, dass die ermittelten Koordinaten für alle Lichtquellen nahe oder sogar auf der Planck'schen Ortskurve liegen. Erstaunlich ist dies bezüglich der Leuchtstoffröhre (TL84), da diese ein Linienspektrum besitzt und somit nicht mit dem kontinuierlichen Spektrum eines Planck'schen Strahlers vergleichbar ist [WS82]. Diese Lichtquelle wurde daher bei keiner Kalibrierung verwen-

⁶A entspricht einer Wolframglühfadenlampe der Farbtemperatur 2856 K, D65 repräsentiert eine Tageslichtphase korrelierter Farbtemperatur von ca. 6504 K [WS82], TL84 entspricht einer Leuchtstoffröhre korrelierter Farbtemperatur von 4100 K (Quelle, 28.11.2007: www.justnormlicht.com/de/media/files/just-Katalog2006_D.pdf).

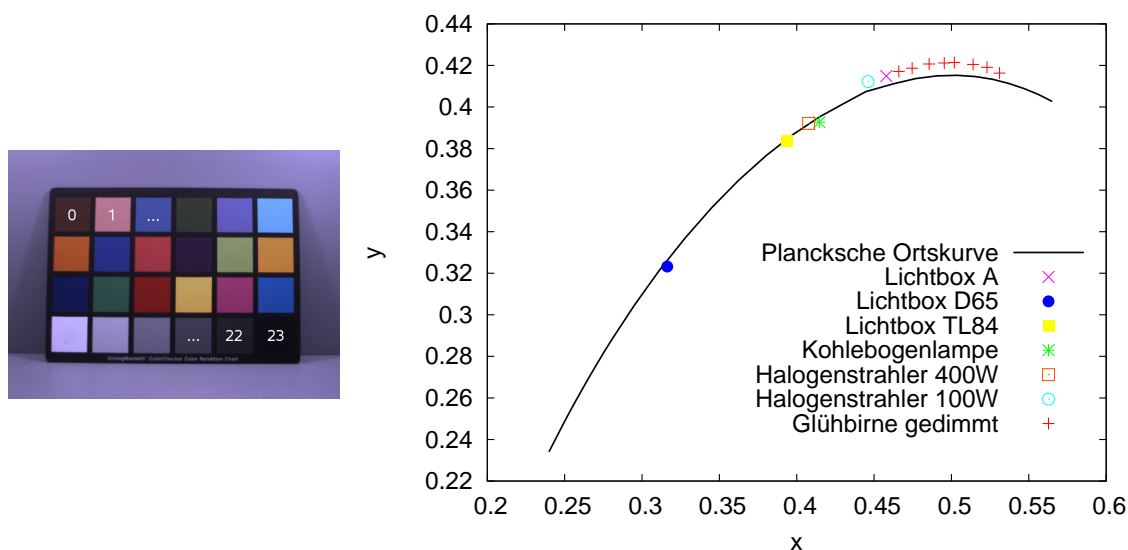


Abbildung 4.5: Links: Macbeth ColorChecker® mit Nummerierung von links oben nach rechts unten. Rechts: CIE 1931 (x,y)-Chromatizitätsdiagramm mit Planck'scher Ortskurve und (x,y)-Koordinaten der Lichtquellen ((x,y)-Chromatizitätskoordinaten der Planck'schen Ortskurve aus [WS82]).

det. Die Chromatizitätskoordinaten der Glühbirne zeigen deutlich, dass durch das Dimmen verschiedene Farbtemperaturen erreicht werden können. In Abschnitt 7.2 werden die Ergebnisse verschiedener Kalibrierungen der Netzwerk- und der Firewire-Kamera vorgestellt und analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass nur die Verwendung von drei bis sechs Dimmstufen der Glühbirne bereits ausreicht, um die invariante Richtung zu schätzen. Somit ist die Kalibrierung mit künstlichen Lichtquellen mit weniger Aufwand durchführbar als eine Tageslichtkalibrierung.

Bewertung der Kalibrierung Ob die Punkte, die zu einem Farbfeld gehören, im Log-Chromatizitäts-Raum annähernd auf einer Geraden liegen, hängt davon ab, wie gut die Annahmen des Verfahrens erfüllt sind. Angenommen, dass die geforderten Umgebungsbedingungen (Planck'sche Beleuchtung, matte Szene) gegeben sind, kann die Kalibrierung zeigen, ob die Kamera die Anforderungen (Linearität, Schmalbandigkeit) hinreichend er-

füllt und das Verfahren zur Schattendetektion somit überhaupt anwendbar ist. Bei der Geradenanpassung [AV05] wird auch der Anpassungsfehler, der mittlere quadratische Abstand $\bar{\sigma}^2$ der Datenpunkte zur approximierten Gerade berechnet. Dieses Maß wird in Abschnitt 7.2 verwendet, um die Ergebnisse verschiedener Kalibrierungen zu bewerten. Je geringer der Anpassungsfehler ist, umso weniger weichen die Datenpunkte von der Geraden ab. Umso zuverlässiger ist die Schätzung der invarianten Richtung. In [FH01, DCHF02] werden zur Beurteilung der Kalibrierung die invarianten Darstellungen der Kalibrierenaufnahmen berechnet. Der invariante Wert zu einem Farbfeld soll unabhängig von der Beleuchtung sein. Das heißt, die über alle Farbfelder gemittelte Varianz der invarianten Werte eines Farbfelds unter verschiedenen Beleuchtungen soll möglichst klein sein. Dieser Wert entspricht gerade dem Anpassungsfehler.

4.3 Berechnung des Schattenkantenbilds

Die in der Arbeit umgesetzte Schattenkantendetektion orientiert sich an dem von Finlayson et al. [FHD02a] kurz beschriebenen Vorgehen. Dort wird zunächst die invariante Darstellung des Ausgangsfarbbilds berechnet. Anschließend wird eine Kantendetektion auf dem invarianten Bild und auf jedem der drei Farbkanäle des Ausgangsbilds durchgeführt. Zur Kantendetektion wird der SUSAN-Algorithmus [SB97] eingesetzt, der Canny-Operator [Can86] wird als Alternative vorgeschlagen. Mit einem Filter wird zunächst eine Glättung durchgeführt. Nach der Kantendetektion wird ein Schwellwert angewendet, so dass das Kantenbild nur starke Kanten enthält. Schließlich wird ein Pixel als Schattenkantenpixel klassifiziert, wenn es in einem der drei Kanäle des Ausgangsfarbbilds ein Kantenpixel darstellt, aber nicht im invarianten Bild. Durch Anwendung von morphologischen Operationen werden die Kanten im binären Schattenkantenbild verbreitert.

Im Folgenden wird die eigene Umsetzung der Schattenkantendetektion genauer erläutert. Gegeben:

- Farbbild f mit Schlagschatten
- Invarianter Winkel α

Gesucht:

- Binäres Schattenkantenbild s mit

$$s(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \text{für Schattenkante an } f(\mathbf{x}) \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.21)$$

Das Struktogramm in Abbildung 4.7 zeigt den Algorithmus zur Detektion der Schattenkanten. In Anhang B.2 sind in Tabelle B.3 alle benötigten Eingabeparameter aufgelistet. Zunächst wird das invariante Grauwertbild berechnet. Der Algorithmus wird durch das Struktogramm in Abbildung 4.8 beschrieben. Der grundlegende Algorithmus entspricht dem in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Vorgehen. Zu Beginn werden aber Kanalwerte, die im Ausgangsfarbbild Null sind, auf 0.0001 gesetzt, da der Logarithmus für Null nicht definiert ist. Außerdem wird am Ende aus den invarianten Werten durch Exponentierung und lineare Skalierung auf den darstellbaren Bereich $[0, 255]$ ein invariantes Grauwertbild berechnet.⁷

Zum Ausgangsfarbbild und zum invarianten Grauwertbild werden Kantenbilder erstellt. Vor jeder Kantendetektion wird auf das jeweilige Bild ein Bilateraler Filter [TM98] angewendet. Da dieser eine kantenerhaltende Glättung der Bildwerte durchführt, eignet er sich sehr gut als Vorverarbeitung zur Kantendetektion. Für die Kantendetektion wird der Canny-Operator verwendet, der ein binäres Kantenbild liefert. Zur Berechnung des Kantenbilds des Farbbilds f wird der Canny-Operator zunächst auf jeden Kanal angewendet. Wenn in mindestens einem Kanal ein Kantenpixel vorliegt, so ist das entsprechende Pixel im Farbkantenbild c_{col} ein Kantenpixel.

Analog zu [FHD02a] ergibt sich das binäre Schattenkantenbild s zunächst aus dem Vergleich der Kantenbilder: Ein Schattenkantenpixel ist ein Pixel, das im Farbbild ein Kantenpixel darstellt, aber nicht im invarianten Bild. Da sich die Kantenpixel, die denselben Kantenpunkt in der Szene repräsentieren im invarianten Kantenbild und im Farbkantenbild nicht exakt an der gleichen Stelle befinden (verursacht durch unterschiedliche Parameter

⁷Die zur Kantendetektion verwendeten Algorithmen aus der PUMA-Bibliothek (s. Anhang E) arbeiten nicht mit Fließkommawerten.

bei der Glättung und beim Canny-Operator), ergab dieser einfache Vergleich der Kantenpixel zahlreiche, vereinzelte, falsch klassifizierte Schattenkantenpixel. Um dieses Problem zu umgehen, wird auf dem invarianten Kantenbild vor dem Vergleich eine Dilatation durchgeführt. Zur Dilatation wird ein Strukturelement der Fenstergröße 3×3 verwendet.

Wie in Abschnitt 4.1.2 angesprochen, können auch Oberflächenpunkte unterschiedlicher Reflektanz auf denselben invarianten Wert abgebildet werden. Wenn dies benachbarte Flächen betrifft, befindet sich im invarianten Kantenbild keine Kante zwischen den Flächen, sodass eine solche Materialkante fälschlicherweise als Schattenkante klassifiziert wird. Bei den in der Arbeit durchgeführten Experimenten (s. Abschnitt 7.4) trat dieser Fall sehr häufig auf, was zu starken Artefakten bei der Schattenentfernung führt. Um Fehlklassifikationen zu vermeiden, werden die detektierten Schattenkantenpixel einer weiteren Prüfung unterzogen. Es soll festgestellt werden, ob sich das Kantenpixel an der Grenze zwischen zwei Flächen unterschiedlicher Reflektanz befindet. Wie in [CGPP01] wird hier angenommen, dass sich die Farbinformation bei Übergang in den Schattenbereich nur gering ändert. Schattenkantenpixel, an deren Position sich im Farbbild die Farbinformation stark ändert, werden daher nicht verwendet. Konkret wird ein Vergleich des Schattenkantebilds mit dem Kantenbild c_{hue} des Farbton-Kanals der HSV-Darstellung des Farbbilds vorgenommen. Die Hysteresis-Threshold-Parameter des Canny-Operators, der auf den Hue-Kanal angewendet wird, werden so gewählt, dass nur sehr starke Kanten detektiert werden (s. Anhang B.2, Tabelle B.3). Detektierte Schattenkantenpixel, an deren Stelle sich im Hue-Kantenbild ein Kantenpixel befindet, werden verworfen.

Abschließend werden die Schattenkanten wie in [FHD02a] durch eine Dilatation verbreitert. Dies ist für eine ausreichende Schattenentfernung erforderlich (s. Abschnitt 5.2).

Abbildung 4.6 zeigt beispielhafte Ergebnisse des Verfahrens. Im invarianten Bild in Abbildung b) sind Schattenkanten teilweise noch vorhanden, sodass diese nicht detektiert werden können. Die Schattenkantenbilder in Abbildung c) und d) weisen daher Lücken auf. Außerdem liegen falsch klassifizierte Schattenkantenpixel vor. Deren Anzahl ist bei Berücksichtigung der Hue-Information geringer. Eine ausführliche Präsentation von Ergebnissen ist in Abschnitt 7.4 zu finden.

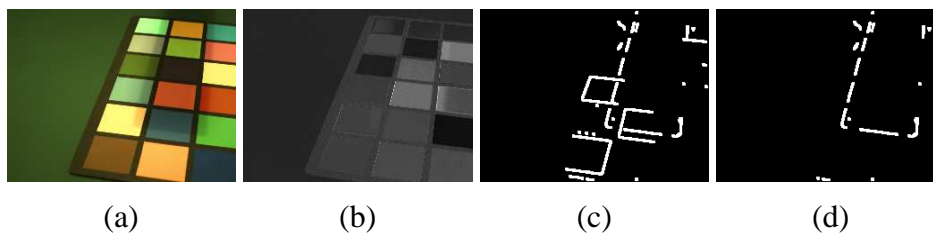


Abbildung 4.6: a) Farbbild mit Schatten, b) invariantes Grauwertbild, c) detektierte Schattenkanten ohne Berücksichtigung der Hue-Information, d) mit Berücksichtigung der Hue-Information.

4.4 Einschränkungen

Im Folgenden werden Einschränkungen des beschriebenen Verfahrens zur Schattenkantendetektion zusammengefasst. Die Anwendbarkeit und das Ergebnis des Verfahrens sind zunächst davon abhängig, wie gut die verwendete Kamera und die Beleuchtung die Annahmen des Verfahrens erfüllen. Damit Schattenkanten im Bild detektiert werden können, müssen ausreichend scharfe Schattenkanten vorliegen. Das Verfahren ist also eher zur Detektion von Schlagschatten und nicht zur Detektion von Selbstschatten geeignet. Schwierigkeiten können sich auch bei Schlagschatten mit einer komplexen Kante ergeben, da das Verfahren auf einer Kantendetektion beruht. Außerdem können nur Schattenkanten detektiert werden, die nicht mit einer Materialkante zusammenfallen.⁸ Es wurde bereits auf die Problematik hingewiesen, dass Materialkanten fälschlicherweise als Schattenkanten klassifiziert werden können. Dies ist der Fall, wenn sich benachbarte Flächen nur in der Intensität unterscheiden, kann aber auch bei Flächen unterschiedlicher Chromatizität auftreten. In der eigenen Umsetzung wird daher zusätzlich die Hue-Information berücksichtigt, allerdings impliziert dieses Vorgehen, dass sich die Lichtquellen in der Szene nicht stark in der Farbe unterscheiden.

⁸Diese Eigenschaft ist im Zusammenhang mit der Schattenentfernung (Abschnitt 5.2) aber erwünscht.

Eingabe: Farbbild f , Winkel α , Parameter: Flag hue , Parameter für die Bilateralen Filter, Parameter für die Canny-Operatoren	
$g_s = \text{computeInvariantImage}(f, \alpha)$	
<i>Kantendetektion</i>	
$f' = \text{BilateralFilter}(f)$	
FOR jeden Kanal $k \in \{r, g, b\}$	
Binäres Kantenbild $c_k = \text{Canny}(f'^{(k)})$	
FOR jede Pixelposition \mathbf{x}	
$c_{\text{col}}(\mathbf{x}) = c_r(\mathbf{x}) \vee c_g(\mathbf{x}) \vee c_b(\mathbf{x})$	
$g'_s = \text{BilateralFilter}(g_s)$	
Binäres Kantenbild $c_{\text{inv}} = \text{Canny}(g'_s)$	
<i>Vergleich der Kantenbilder</i>	
Initialisiere binäres Schattenkantenbild s mit $s(\mathbf{x}) = 0$	
$c'_{\text{inv}} = c_{\text{inv}} \oplus S_{3 \times 3}$	
FOR jede Pixelposition \mathbf{x}	
IF	$(c_{\text{col}}(\mathbf{x}) == 1) \wedge (c'_{\text{inv}}(\mathbf{x}) == 0)$
THEN	$s(\mathbf{x}) = 1$
IF	$hue == true$
THEN	<i>Vermeidung von Fehlklassifikation</i>
	$h = \text{HSV}(f)$
	Binäres Kantenbild $c_{\text{hue}} = \text{Canny}(h^{(0)})$
	$c'_{\text{hue}} = c_{\text{hue}} \oplus S_{3 \times 3}$
	FOR jede Pixelposition \mathbf{x}
IF	$(s(\mathbf{x}) == 1) \wedge (c'_{\text{hue}}(\mathbf{x}) == 1)$
THEN	$s(\mathbf{x}) = 0$
<i>Verbreitern der Schattenkanten</i>	
$s = s \oplus S_{3 \times 3}$	
Ausgabe: Binäres Schattenkantenbild s	

Abbildung 4.7: Struktogramm zur Schattenkantendetektion mit Dilatationsoperator \oplus .

Eingabe: Farbbild f , Winkel α	
<i>Berechnung des invarianten Bilds</i>	
FOR jede Pixelposition \mathbf{x}	
<i>Berechnung der Geometric Mean 2-D Chromatizitäts-Koordinaten</i>	
FOR jeden Kanal $k \in \{r, g, b\}$	
$v_k = f^{(k)}(\mathbf{x})$	
IF	$v_k == 0$
THEN	$v_k = 0.0001$
$\mu = \sqrt[3]{v_r v_g v_b}$	
FOR jeden Kanal $k \in \{r, g, b\}$	
$\chi'_k = \ln(v_k) - \ln(\mu)$	
$\chi = A^T \chi'$	
<i>Berechnung des invarianten Werts</i>	
$g(\mathbf{x}) = \chi_1 \cos(\alpha) + \chi_2 \sin(\alpha)$	
<i>Berechnung des invarianten Grauwertbilds</i>	
FOR jede Pixelposition \mathbf{x}	
$g_{exp}(\mathbf{x}) = \exp(g(\mathbf{x}))$	
Berechne lineare Skalierung g_s von g_{exp} auf den diskreten Wertebereich $[0, 255]$	
Ausgabe: Invariantes Grauwertbild g_s	

Abbildung 4.8: Struktogramm zur Berechnung des invarianten Grauwertbilds.

Kapitel 5

Schattenentfernung mit dem Retinex-Algorithmus

Ursprünglich stellt die Retinex-Theorie ein Modell der menschlichen Farbwahrnehmung nach Edwin H. Land [LM71] dar. Land entwickelte damit einen Farbkonstanzalgorithmus bei nicht uniformer Beleuchtung [Ebn07], der in der Bildverarbeitung für verschiedene Anwendungszwecke, wie z. B. Farbkorrektur oder Dynamikreduktion [JRW97a], angepasst und erweitert wurde. In diesem Kapitel wird zunächst die Theorie Lands, sowie sein pfadbasierter Retinex-Algorithmus erläutert. Anschließend werden die Modifikation zur Entfernung von Schlagschatten nach Finlayson et al. [FHD02b] sowie die eigene Umsetzung und Anpassungen des Verfahrens behandelt.

5.1 Retinex-Theorie

Die menschliche Farbwahrnehmung wird in der Retinex-Theorie von Edwin H. Land [LM71] als ein System beschrieben, das aus drei voneinander unabhängigen retinal-cortikalen Systemen besteht. Ein solches System wird als *Retinex* bezeichnet, weil angenommen wird, dass die Verarbeitung visueller Reize in der Retina und im Cortex stattfindet. Angefangen bei den drei Zapfentypen auf der Retina, die jeweils auf lang-, mittel- oder kurzwelliges Licht reagieren, wird die visuelle Information aus den drei Wellenlängenbe-

reichen unabhängig voneinander verarbeitet. Jedes Retinex System erzeugt für den zugehörigen Wellenlängenbereich ein so genanntes *Lightness*-Bild der Szene. Diese *Lightness* wird dabei als biologisch wahrgenommene Reflektanz [Lan77] verstanden. Land entwickelte seine Retinex-Theorie aus einer Reihe von Experimenten zur menschlichen Farbwahrnehmung, wobei er besonders das Phänomen der Farbkonstanz untersuchte. Im folgenden Abschnitt, werden die wichtigsten Experimente [LM71, Lan74] erläutert, die zur Retinex-Theorie geführt haben. Anschließend wird der pfadbasierte Retinex-Algorithmus betrachtet, der den Prozess der Bestimmung der *Lightness* beschreibt.

5.1.1 Experimente zur menschlichen Farbwahrnehmung

Als Stimulus diente ein so genanntes Mondrian Muster. Wie in Abbildung 5.1, links beispielhaft dargestellt, ist das eine zufällige Anordnung von rechteckigen, farbigen und matten Flächen. Dieses Muster wurde von drei Projektoren beleuchtet, wobei jeder mit einem anderen scharf begrenzten Bandpass-Filter versehen wurde, sodass jeweils nur Licht aus dem kurz-, mittel- oder langwelligen Bereich abgestrahlt wurde. Die Strahlungsleistung jedes Projektors konnte individuell geregelt werden. Zunächst wurden alle Projektoren angeschaltet und so geregelt, dass die Farbfelder gut gesättigt und die weißen Flächen gut weiß erschienen. Mit diesen Einstellungen wurde das Muster nacheinander von jeweils nur einem Projektor beleuchtet. Mit einem teleskopischen Photometer wurde jeweils die reflektierte Leuchtdichte des weißen Farbfelds gemessen. Es ergaben sich also drei Werte, die reflektierte Leuchtdichte unter lang-, mittel- und kurzwelliger Beleuchtung. Anschließend wurde der Photometer auf das dunkelbraune Farbfeld gerichtet. Die Projektoren wurden so geregelt, dass die für die verschiedenen Wellenlängenbereiche reflektierten Leuchtdichtewerte den zuvor gemessenen Werten des weißen Felds entsprachen. Der Farbeindruck, den das braune Farbfeld bei der Testperson hervorrief, blieb aber im Wesentlichen unverändert. Dieser Versuch wurde mehrfach, auch mit weiteren Farbfeldern durchgeführt, immer mit dem Ergebnis, dass der Farbeindruck des jeweiligen Farbfelds im Wesentlichen konstant blieb. Unter den verschiedenen Einstellungen blieb auch der Farbeindruck der übrigen Farbfelder nahezu gleich. Der Farbeindruck hängt also im Wesentlichen von der Reflektanz des betrachteten Objekts ab und nicht vom Licht, das vom Objekt reflektiert wird, also dem Produkt von der Reflektanz und dem Licht, das auf das Objekt trifft [LM71]. In

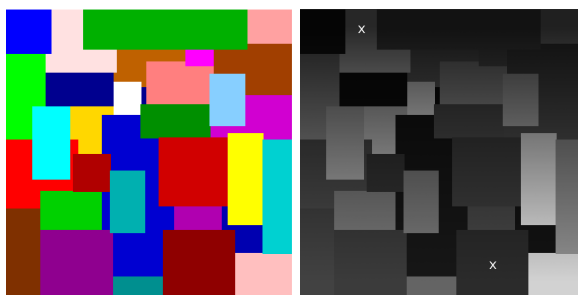


Abbildung 5.1: Links: Ein Mondrian Muster, ähnlich, wie es Land für seine Experimente zur menschlichen Farbwahrnehmung verwendet hat (Abbildung aus [Ebn07]). Rechts: Durch einen Gradienten von dunkel (oben) nach hell (unten) simulierte nicht uniforme Beleuchtung eines Graustufen-Musters. Die Intensitätswerte an den Markierungen sind gleich.

einem weiteren Experiment [Lan74] wurden einzelne Farbfelder nacheinander durch ein Rohr betrachtet, sodass jeweils nur ein Farbfeld sichtbar war. Unter dieser, vom übrigen Sichtfeld isolierten Betrachtung der Farbfelder, wurde die Farbe immer als gräulich weiß empfunden. Die farbkonstante Wahrnehmung ist also ein Prozess, bei dem die Farbreize aus dem gesamten Sichtfeld mit einbezogen werden. Ein weiteres Experiment [LM71] zeigte, dass Reflektanzverhältnisse von Farbflächen trotz örtlich schwankender Beleuchtung korrekt wahrgenommen werden. Die Beleuchtung wurde so geregelt, dass für zwei Flächen unterschiedlicher Reflektanz dieselbe reflektierte Leuchtdichte gemessen wurde. Der menschliche Betrachter konnte aber bestimmen, dass die eine Fläche heller ist als die andere. Abbildung 5.1 zeigt rechts ein nachgestelltes Beispiel in Graustufen. Durch den überlagerten Gradienten von dunkel (oben) nach hell (unten) sind die Pixelwerte an den markierten Positionen gleich. Dennoch wird die obere Fläche vom menschlichen Betrachter als heller wahrgenommen.

5.1.2 Pfadbasierter Retinex-Algorithmus nach Land

Aus den Experimenten folgerten Land und McCann [LM71], dass sich die Farbempfindung aus dem Vergleich der Farbreize der Flächen im gesamten Sichtfeld ergibt. Auf das

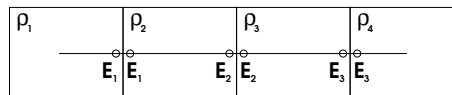


Abbildung 5.2: Schematisch dargestellter Pfad, der sich über vier Farbflächen mit den Reflektanzen ρ_1, \dots, ρ_4 erstreckt. An den über Flächengrenzen direkt benachbarten Punkten ist die Beleuchtung E jeweils gleich.

Auge (die Kamera) trifft das Produkt $E\rho$ von Beleuchtung und Reflektanz, die Reflektanz eines Punkts kann also nicht direkt bestimmt werden. Sie wird daher relativ zu anderen Punkten im Sichtfeld bestimmt. Bei uniformer Beleuchtung ergibt sich die relative Reflektanz eines Punkts p_2 zu einem anderen Punkt p_1 aus dem Verhältnis der gemessenen Intensitäten: $\frac{\rho_2 E}{\rho_1 E} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$. Bei nicht uniformer Beleuchtung gilt dies für direkt benachbarte Punkte, wenn angenommen wird, dass die Beleuchtung örtlich nur leicht schwankt. Für entfernte Punkte kann die relative Reflektanz entlang eines beliebigen Verbindungspfads zwischen den Punkten bestimmt werden: Sie wird durch das sogenannte Pfadprodukt berechnet, das Produkt der Intensitätsverhältnisse von über Flächengrenzen benachbarten Punkten entlang des Verbindungspfads. Abbildung 5.2 zeigt schematisch einen Pfad entlang von vier Flächen mit den Reflektanzen ρ_1, \dots, ρ_4 . Die Beleuchtung wird an den jeweils über die Flächengrenzen benachbarten Punkten als annähernd gleich angenommen, sodass ihr Einfluss aus dem Produkt entfällt: $\frac{E_1 \rho_2}{E_1 \rho_1} \cdot \frac{E_2 \rho_3}{E_2 \rho_2} \cdot \frac{E_3 \rho_4}{E_3 \rho_3} = \frac{\rho_4}{\rho_1}$.

Wenn der Startpunkt des Pfads die maximale Reflektanz von 1 besitzt, entspricht das Pfadprodukt der Reflektanz des Endpunkts. Wäre ein solcher Referenzpunkt bekannt, könnte also die Reflektanz jedes Punkts durch das Pfadprodukt entlang eines Pfads vom Referenzpunkt zum jeweiligen Punkt berechnet werden. Da der Referenzpunkt nicht bekannt ist, wird die *Lightness* jedes Punkts im Sichtfeld angenähert. Dazu werden mehrere zufällige Pfade zum betrachteten Punkt verfolgt und das Ergebnis aus den Pfadprodukten gemittelt. Abbildung 5.3 veranschaulicht die Berechnung des Pfadprodukts entlang eines Pfads. Für den Startpunkt des Pfads wird der maximale Reflektanzwert angenommen, das Pfadprodukt wird mit 1 initialisiert. Das Pfadprodukt entspricht also immer dem Lightness-Wert am jeweiligen Punkt. Wenn das Pfadprodukt größer 1 wird, so muss die Reflektanz des aktuellen Punkts größer sein, als die des Startpunkts. In diesem Fall erfolgt ein *Reset*: Ab

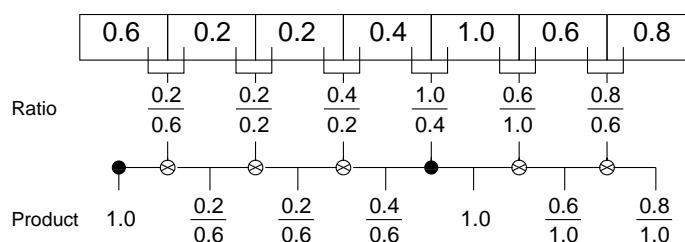


Abbildung 5.3: Schematisch dargestellte Berechnung des Pfadprodukts entlang eines Pfads von sieben Punkten. Zur Vereinfachung der Darstellung wird eine uniforme Beleuchtung von 1 angenommen, die dargestellten Intensitäten der Punkte, $0.6, \dots, 0.8$, entsprechen also den Reflektanzen. In der zweiten Zeile sind die Verhältnisse von aufeinander folgenden Punkten dargestellt. Die dritte Zeile zeigt die Berechnung des Pfadprodukts. Ergibt sich ein Pfadprodukt größer 1, erfolgt ein Reset: Das Pfadprodukt am aktuellen Punkt wird mit der maximalen Reflektanz neu initialisiert (Abbildung nach [LM71]).

diesem Punkt wird die Berechnung des Pfadprodukts neu gestartet. Wenn tatsächlich ein Punkt mit der maximalen Reflektanz gekreuzt wird, entsprechen alle folgenden Pfadprodukte dem tatsächlichen Reflektanzwert am aktuellen Punkt.

Die folgende mathematische Beschreibung des Retinex-Algorithmus orientiert sich an [LM71, Lan83] und [Ebn07]. In [Lan83] formulierte Land seine Theorie erstmals mathematisch, ließ aber den Reset-Schritt, der in [LM71] beschrieben wird, aus. Auch bei Ebner [Ebn07] wird der Reset-Schritt nur im Text beschrieben. Im Folgenden wird eine vollständige Beschreibung des Algorithmus geliefert.

Der Retinex-Algorithmus arbeitet auf logarithmierten Pixelwerten, die Division wird also zur Differenz, die Multiplikation zur Summe. Der Lightness-Wert $l^{(k)}(\mathbf{x})$ des Pixels \mathbf{x} im Kanal $k \in \{r, g, b\}$ ergibt sich aus der Mittelung von n sequentiellen Pfadprodukten¹

$$l^{(k)}(\mathbf{x}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s_{\mathbf{x}_{\text{in}_i}}^{(k)}, \quad (5.1)$$

¹Im logarithmischen Raum handelt es sich eigentlich um Pfadsummen, da in späteren Beispielen zur Vereinfachung mit nicht logarithmierten Werten gerechnet wird, wird einheitlich der Ausdruck Pfadprodukt verwendet.

n ist die Anzahl der Pfade, die \mathbf{x} kreuzen. Pfad i startet an der zufälligen Position \mathbf{x}_0^i und führt über m_i Pixel zur Pixelposition $\mathbf{x}_{m_i}^i = \mathbf{x}$

Beim Start wird das Pfadprodukt mit 0 initialisiert und entlang des Pfads immer um die Differenz des aktuellen logarithmischen Pixelwerts zum vorigen logarithmischen Pixelwert erhöht:

$$s_{\mathbf{x}_0^i}^{(k)} = 0 \quad (5.2)$$

$$s_{\mathbf{x}_j^i}^{(k)} = \delta_R(s_{\mathbf{x}_{j-1}^i}^{(k)} + \Theta(\log(f^{(k)}(\mathbf{x}_j^i)) - \log(f^{(k)}(\mathbf{x}_{j-1}^i)))) \quad (5.3)$$

mit $j = 1, \dots, m_i$. Die Funktion δ_R realisiert den Reset Schritt:

$$\delta_R(sum) = \begin{cases} 0, & \text{für } sum > 0 \\ sum, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.4)$$

Durch den Reset Schritt wird eine Farbkorrektur der Pixelwerte erreicht, da im Mittel versucht wird, eine Normierung mit dem hellsten Pixel durchzuführen. Die Schwellwertfunktion Θ eliminiert den Einfluss nicht uniformer Beleuchtung:

$$\Theta(dif) = \begin{cases} 0, & \text{für } dif \leq \theta \\ dif, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.5)$$

Der Schwellwert θ wird dabei so gewählt, dass Differenzen dif , die annähernd Null ergeben, auf Null gesetzt werden, weil angenommen wird, dass leichte Unterschiede benachbarter Pixelwerte durch Schwankungen in der Beleuchtung verursacht werden.

Wie die Pfade erzeugt werden, wird erst in späteren Beiträgen von Land et al. behandelt [Lan83, Lan86b]. Nach [Lan86b] führen mehrere hundert, zufällig über das gesamte Sichtfeld verteilte Pfade zu einem Punkt, um dessen Lightness zu berechnen. Die Startpunkte, sowie die Punkte, entlang derer die Pfade laufen, werden dabei rein zufällig gewählt. In [Lan83] starten von zufälligen Punkten aus dem gesamten Sichtfeld mehrere hundert Pfade, die sich zufällig über das Sichtfeld bewegen. Alle Pfade, die einen bestimmten Punkt kreuzen, tragen zu dessen Lightness bei, indem die Pfadprodukte an diesem Punkt gemittelt werden. Dieser Ansatz wird auch in der eigenen Umsetzung in Abschnitt 5.2.1 aufgegriffen.

5.1.3 Alternative Retinex-Verfahren

Neben dem ursprünglichen pfadbasierten Retinex-Algorithmus von Land wurden verschiedene Varianten entwickelt. Die neuen Verfahren sind mit weniger Rechenaufwand verbunden, da sie meist speziell für konkrete Anwendungszwecke in der Bildverarbeitung entwickelt wurden. Damit verbunden sind Änderungen des grundlegenden Algorithmus, sodass neue Implementierungen zum Beispiel die Schwellwertfunktion oder den Reset-Schritt nicht mehr umsetzen. Die Schwellwertfunktion wurde vernachlässigt, da die Wahl des richtigen Schwellwerts bei natürlichen Bildern, die nicht die Annahme einer Mondrian-Welt² erfüllen, schwierig ist [Ebn07]. Außerdem wurde festgestellt [PDCRM05], dass sich die Ergebnisse mit oder ohne Schwellwertfunktion bei natürlichen Bildern nicht wesentlich unterscheiden. Auch Land bezog die Schwellwertfunktion später nicht mehr mit ein. Beim so genannten *Single Scale Center Surround Retinex*-Verfahren nach Land [Lan86a] wird der Lightness-Wert eines Pixels einfach durch die Differenz des logarithmischen Pixelwerts und des Logarithmus der mittleren Helligkeit von Pixeln in der Umgebung berechnet. Es werden verschiedene Varianten vorgeschlagen, die zum Beispiel zur Kompression des Dynamikumfangs oder zur Tonwertkorrektur [JRW97b] eingesetzt werden. Bei den *Multiscale Retinex*-Verfahren [JRW97a] wird eine gewichtete Summe von mehreren Single Scale Retinex-Berechnungen, die jeweils verschieden weite Umgebungen mit einbeziehen, berechnet. In [FCM00] werden MATLAB-Implementierungen von zwei effizienten Retinex-Verfahren [FM83, McC99] vorgestellt. Auch hier wird die Schwellwertfunktion nicht umgesetzt.

Die bereits in Abschnitt 3.1 angesprochenen Lightness-Algorithmen [Hor74, Bla83] stellen im Prinzip auch Varianten des Retinex-Algorithmus dar. Diese basieren wiederum auf der Idee, dass starke Intensitätsschwankungen aus einer Reflektanzänderung und schwache aus einer Beleuchtungsschwankung resultieren. Analog zur Schwellwertfunktion beim pfadbasierten Retinex werden hier kleine Gradienten auf Null gesetzt. Wie diese Verfahren zur Entfernung von Schatten adaptiert [FHD02a, FHLD06, Wei01] werden, wurde ebenfalls in Abschnitt 3.1 erläutert.

²Bei Mondrian-Bildern gilt: Starke Intensitätsschwankungen resultieren aus einer Reflektanzänderung, schwache dagegen aus einer Beleuchtungsschwankung.

Auch das in dieser Arbeit nach Finlayson et al. [FHD02b] umgesetzte Verfahren zur Schattenentfernung mit dem pfadbasierten Retinex adaptiert die Schwellwertfunktion zum Zweck der Schattenentfernung. Der vom Aufwand komplexere pfadbasierte Ansatz wurde gewählt, da eine Einbindung der Schattenentfernung in die neueren, effizienteren Verfahren, die keine Schwellwertfunktion mehr einsetzen, schwer möglich ist [FHD02b].

5.2 Schattenentfernung mit dem pfadbasierten Retinex

Der Retinex-Algorithmus nach Land [LM71] kann nur leichte Beleuchtungsschwankungen ausgleichen. Finlayson et al. [FHD02b] passen die Schwellwertfunktion beim pfadbasierten Retinex so an, dass Schlagschatten eliminiert werden können. Es wird angenommen, dass ein binäres Schattenkantenbild $s(\mathbf{x})$, in dem Schattenkantenpixel den Wert 1 besitzen, gegeben ist (vgl. Gleichung 4.21). Anstelle der Schwellwertfunktion Θ in Gleichung 5.3 wird die Funktion

$$\Theta'(dif_j) = \begin{cases} 0, & \text{für } s(\mathbf{x}_j) = 1 \\ dif_j, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.6)$$

verwendet. An einer Schattenkante wird somit die Differenz der entlang des Pfads benachbarten logarithmischen Pixelwerte auf Null gesetzt, der Lightness-Wert des vorigen Pixels wird übernommen, um den Einfluss der Beleuchtungsänderung zu eliminieren. Implizit wird dabei angenommen, dass eine Schattenkante nicht mit einer Materialkante zusammen fällt, sondern nur in homogenen Flächen auftritt. Über die Schattenkante ist die Reflektanz benachbarter Punkte also gleich. Abbildung 5.4 zeigt schematisch, wie die Lightness-Werte im Schatten (grau dargestellt) korrigiert werden. Zur Veranschaulichung sind nicht logarithmierte Pixelwerte dargestellt, sodass Verhältnisse und nicht Differenzen benachbarter Werte berechnet werden. Die Beleuchtungsänderung im Schatten verursacht eine Halbierung der Intensität der Pixel. Die Pfeile kennzeichnen die gegebenen Schattenkantenpixel. An der Schattenkante wird das Verhältnis der benachbarten Pixel auf Eins gesetzt, sodass der Wert des Pfadprodukts in den Schatten übernommen wird. Intensitätsschwankungen, also Strukturen im Schatten bleiben erhalten, bei Austritt aus dem Schatten wird das Verhältnis wieder gleichgesetzt, sodass sich auch nach dem Schatten korrekte Werte

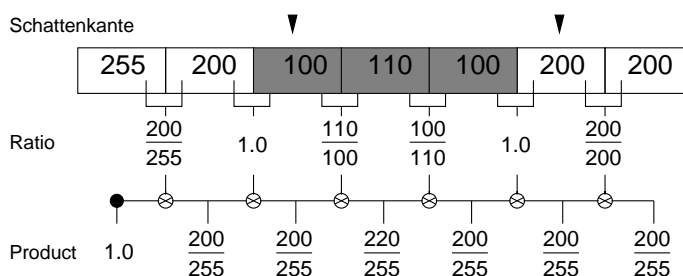


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung eines Pixelpfads mit Schattenpixeln (grau dargestellt) zur Veranschaulichung der Schatteneliminierung.

ergeben. Um die Schattenkante nicht zu verpassen, sollte ein Schattenkantenbild mit ausreichend breiten Schattenkanten vorliegen. Auch ein Schlagschatten stellt einen weichen Übergang der Pixelwerte dar. Die Schattenkante muss diesen Übergangsbereich abdecken, damit der Schatten entfernt werden kann. Der letzte Schritt der Schattenkantendetektion (s. Abschnitt 4.3) ist daher eine Dilatation der Schattenkante.

5.2.1 Umsetzung

Im Folgenden wird zunächst die von Finlayson et al. [FHD02b] grob beschriebene Umsetzung zusammengefasst. Anschließend werden die sich daran orientierende eigene Implementierung und Modifikationen des Verfahrens genauer betrachtet.

In [FHD02b] wird der in Abschnitt 5.1.2 beschriebene Algorithmus umgesetzt, wobei anstelle der Schwellwertfunktion Θ die Funktion Θ' zur Entfernung von Schatten verwendet wird. Die Erzeugung der Pfade orientiert sich an einer Retinex-Umsetzung von Marini und Rizzi [MR00]. Dort wird ein Pfad durch einen Algorithmus, basierend auf dem Konzept der Brown'schen Bewegung [Sau88], erstellt. Der Pfad von einem Start- zu einem Endpixel wird wie folgt bestimmt [FHD02b]: Zunächst wird der Mittelpunkt zwischen Start- und Endpixel berechnet und um einen zufälligen Offset versetzt. Das Verfahren wird für eine bestimmte Anzahl an Rekursionen auf den entstandenen Pfadsegmenten rekursiv fortgeführt. Der Pfad besteht dann aus den Pixeln, die sich entlang der Liniensegmente befinden. In [MR00] wird an jeder Pixelposition eine bestimmte Anzahl an Pixeln zufällig gewählt,

von denen aus Pfade erzeugt und zum betrachteten Pixel verfolgt werden. In [FHD02b] werden die Pfade nur einmal relativ von Startpixelposition $(0, 0)$ aus erzeugt. Für jedes Pixel des Bildes werden die vorberechneten Pfadpunkte um die Position des aktuellen Pixels verschoben, sodass alle Pfade in diesem starten. Jeder Pfad wird verfolgt, wobei die Berechnung des Pfadprodukts endet, wenn der Pfad über den Bildrand hinaustritt. Am Ende werden die berechneten Pfadprodukte gemittelt.³ Die Berechnungen werden in allen drei Kanälen ausgeführt. Finlayson et al. [FHD02b] bestätigen die Aussage [MR00], dass durch die Verwendung der Brown'schen Pfade weniger Pfade benötigt werden als bei der rein zufälligen Bestimmung aller Pfadpixel nach Land. Demnach liefern 20 bis 40 Pfade stabile Ergebnisse, während bei zufälligen Pfaden 200 Pfade benötigt werden [MR00]. Die Länge der Pfade sowie Größe der Bilder ist allerdings nicht angegeben. Der Retinex-Algorithmus wird in [FHD02b] zur Schattenentfernung verwendet, es soll keine Farbkorrektur vorgenommen werden. Daher wird das Eingabebild mit einem Rand weißer Pixel versehen. Die Breite des Randes und die Pfadlänge werden so gewählt, dass die meisten Pfade den weißen Rand kreuzen. So kann erreicht werden, dass die Bilder nicht farbkorrigiert werden, allerdings steigt natürlich der Rechenaufwand. Um die Werte darzustellen, wird eine Berichtigung hinsichtlich der Szenenbeleuchtung durch eine Schätzung der Beleuchtung in jedem Kanal durchgeführt.

Das Struktogramm in Abbildung 5.5 beschreibt den in der Arbeit umgesetzten Algorithmus. Der Algorithmus arbeitet auf logarithmierten Bildwerten. Da der Logarithmus nur für Werte größer Null definiert ist, wird vor der Berechnung auf jeden Kanalwert ein Offset von 0.0001 addiert.

In der Implementierung wird die Idee von Land [Lan83] und Brainard und Wandell [BW86] aufgegriffen, jeden Pfad, der ein Pixel kreuzt, zur Mittelung der Pfadprodukte an diesem Pixel zu verwenden und nicht nur die Pfade, die in dem Pixel enden. Dazu werden zu Beginn ein Counterarray und für jeden Kanal ein Akkumulatorarray der Größe des Eingabebilds angelegt und mit Null initialisiert. Im Akkumulatorarray wird in jedem Kanal an der Pixelposition, die von einem Pfad gekreuzt wird, das aktuelle Pfadprodukt im jeweiligen Kanal aufaddiert. Der entsprechende Eintrag im Counterarray wird dabei inkremen-

³In [FHD02b] wird dieser Punkt nicht genauer beschrieben, in [MR00] werden die Pfade von den Endpunkten zum aktuellen Pixel verfolgt und die Pfadprodukte am Ende gemittelt.

tiert. Am Ende werden die Werte im Akkumulatorarray durch die Werte im Counterarray gemittelt.

Die Erzeugung der Pfade orientiert sich an [FHD02b]. Zu Beginn wird einmal eine Liste Brown'scher Pfade erzeugt. Der konkrete Algorithmus ist in Abbildung 5.6 als Struktogramm dargestellt. Es werden vier Parameter benötigt: Die Pfadanzahl pn , die Pfadlänge pl , die Rekursionstiefe rd und der Mittelpunkt-Offset d . Alle Pfade starten an Pixelposition $(0, 0)$. In einem Kreis mit diesem Mittelpunkt und Radius pl werden pn gleichverteilte 2-D Samples als Pfadendpunkte erzeugt. Die Pfadlänge gibt also nicht an, wie viele Pixel zu einem Pfad gehören, sondern wie weit der Endpunkt eines Pfads maximal vom Startpunkt entfernt ist. Ein 2-D Sample wird nach der inversen CDF-Methode [DBBS06] berechnet. Zunächst werden zwei $(0,1)$ -verteilte Zufallszahlen ξ_1 und ξ_2 generiert. Das Sample wird durch den Winkel φ und den Radius r beschrieben:

$$r = pl\sqrt{\xi_1} \quad (5.7)$$

$$\varphi = 2\pi\xi_2. \quad (5.8)$$

Die 2-D Koordinaten des Endpunkts e lauten dann

$$e_x = r \cos(\varphi) \quad (5.9)$$

$$e_y = r \sin(\varphi). \quad (5.10)$$

Zwischen dem Start- und den Endpunkten werden jeweils rekursiv Mittelpunkte und somit Knotenpunkte des jeweiligen Pfads erzeugt. Der Algorithmus wird durch das Struktogramm in Abbildung 5.7 beschrieben. Solange die als Parameter gegebene Rekursionstiefe rd noch nicht erreicht ist, wird zwischen dem gegebenen Start- und Endpunkt ein versetzter Mittelpunkt erzeugt und die Funktion für die beiden neuen Segmente rekursiv aufgerufen. Bei einer Rekursionstiefe von rd werden so 2^{rd} Pfadsegmente, also ein Pfad mit $2^{rd} + 1$ Knotenpunkten (mit Start- und Endpunkt) erzeugt. Jeder Mittelpunkt wird um einen zufälligen Offset o versetzt. Dieser Offset wird als gleichverteiltes 2-D Sample im Kreis mit Radius d erzeugt. Durch den Parameter d kann also der maximale Abstand zwischen dem versetzten Punkt und dem Mittelpunkt auf dem Pfadsegment gesteuert werden.

Nach der Erzeugung der Knotenpunkte eines Pfads werden die entlang der Pfadsegmente liegenden Pixelpositionen bestimmt (s. Struktogramm in Abbildung 5.6). Dazu wird der

Bresenham-Algorithmus [Bre63] verwendet, der ein Verfahren zur Rasterisierung von Linien darstellt. Die Pixelpositionen werden in einer Liste $path$ gesammelt, die einen Pfad repräsentiert. Die Pfadpunktliste wird an eine Liste $pathList$ angehängt, die am Ende alle erzeugten Pfade, die in $(0, 0)$ starten, enthält. Abbildung 5.8 zeigt drei Beispiele von Pfadbündeln, die mit verschiedenen Parametern erzeugt wurden.

In [MR00] wird die Verwendung Brown'scher Pfade damit begründet, dass die benötigte Pfadanzahl gegenüber rein zufälliger Pfaderzeugung etwa um den Faktor 10 verringert werden kann. Außerdem sei die entstehende Struktur der der Neuronen des V4-Areals im visuellen Cortex, die für die Farbwahrnehmung verantwortlich sind, ähnlich. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass die zufällige Struktur der Brown'schen Pfade die Erzeugung sichtbarer Artefakte verringert. In Abschnitt 5.2.2 wird erläutert, wie durch das Verfahren zur Schattenentfernung Artefakte entstehen können. Wenn gerade Pfade ohne Mittelpunktversetzung verwendet werden, entstehen lineare Artefakt-Strukturen. Diese sind auffällig, da das menschliche Auge gegenüber regelmäßigen, geometrischen Strukturen empfindlich ist [Wan95, FF05]. Ergebnisse in Abschnitt 7.4 veranschaulichen diesen Zusammenhang.

Nach der Erzeugung der Brown'schen Pfade werden alle Pixel durchlaufen (s. Struktogramm in Abbildung 5.5). Wie in [FHD02b] werden die generierten Pfadpunkte um die aktuelle Pixelposition verschoben, sodass alle Pfade im betrachteten Pixel starten. Nacheinander werden die Pfade vom aktuellen Pixel aus verfolgt und das sequentielle Pfadprodukt, wie im folgenden Absatz beschrieben, berechnet.

Um keine Farbkorrektur durchzuführen, wurde in der eigenen Umsetzung die Berechnung des Pfadprodukts entlang eines Pfads modifiziert. Im Folgenden wird mathematisch beschrieben, wie die Gleichungen 5.2 bis 5.5 angepasst werden:

$$s_{\mathbf{x}_0^i}^{(k)} = \log(f^{(k)}(\mathbf{x}_0^i)) \quad (5.11)$$

$$s_{\mathbf{x}_j^i}^{(k)} = \delta_R(s_{\mathbf{x}_{j-1}^i}^{(k)} + \Theta'(\log(f^{(k)}(\mathbf{x}_j^i) - \log(f^{(k)}(\mathbf{x}_{j-1}^i))))), \quad (5.12)$$

$$\delta_R(sum_j) = \begin{cases} \log(f^{(k)}(\mathbf{x}_j)), & \text{für } sum_j > \log(255) \\ sum_j, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.13)$$

$$\Theta'(dif_j) = \begin{cases} dif_j, & \text{für } s(\mathbf{x}_j) = 0 \wedge s(\mathbf{x}_{j-1}) = 0 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.14)$$

Das Struktogramm in Abbildung 5.5 zeigt die konkrete Umsetzung. Das Pfadprodukt wird mit dem Wert des Startpixels und nicht mit 0 initialisiert. Wenn an der aktuellen und an der letzten Pfadpixelposition keine Schattenkante vorliegt, wird die Differenz des aktuellen zum vorigen Pixelwert berechnet und auf das Pfadprodukt addiert. Wenn aber eine Schattenkante vorliegt, bleibt das Pfadprodukt unverändert. Die vorige Koordinate entlang des Pfads wird auch überprüft, um einen breiteren Bereich über die Schattenkante zu berücksichtigen. Abbildung 5.9 veranschaulicht die Schattenentfernung. Die Werte des Pfadprodukts entsprechen den gesuchten Pixelwerten. Ohne Farbkorrektur wäre eigentlich auch kein Reset mehr nötig, da dieser genau den Zweck der Farbkorrektur erfüllt. Durch das Eingreifen in die Verhältnisse von Pixelwerten an der Schattenkante können aber fehlerhafte Werte entstehen, die größer sind als der Maximalwert. Abbildung 5.10 zeigt links ein Beispiel, wie sich eine unvollständige Schattenkanteninformation auf das Pfadprodukt auswirkt. Bei Austritt aus dem an dieser Stelle unbekanntem Schatten entstehen fehlerhafte Werte, die sich entlang des weiteren Pfads fortpflanzen. Die Reset-Funktion wird daher entsprechend angepasst: Wenn das Pfadprodukt größer wird als der Logarithmus des Maximalwerts, wird der Pfad neu gestartet, wie rechts in Abbildung 5.10. Wenn der Retinex nicht zur Farbkorrektur eingesetzt wird, sind theoretisch auch nicht mehrere Pfade nötig, um den Wert eines Pixels zu bestimmen. Im folgenden Abschnitt werden aber verschiedene Fehlerfälle genannt, die zeigen, dass die Mittelung mehrerer Pfadprodukte erforderlich ist, um mögliche Artefakte zu reduzieren.

Nachdem alle Pfade für alle Pixel verfolgt wurden, werden die Werte im Akkumulatorarray durch die Werte im Counterarray gemittelt. Zur Darstellung müssen die Werte nur noch exponentiert werden, es ist keine weitere Verarbeitung, wie eine Korrektur der Beleuchtung in [FHD02b], nötig.

5.2.2 Einschränkungen

In diesem Abschnitt werden Einschränkungen des umgesetzten Verfahrens untersucht. In Abschnitt 7.4 werden diese anhand der Ergebnisse von Experimenten veranschaulicht.

Eine Einschränkung des Verfahrens stellt zunächst der große Rechenaufwand dar. Die in Abschnitt 7.4.3 aufgeführten Laufzeiten zeigen, dass das Verfahren nicht echtzeitfähig ist.

Ein Nachteil ist in diesem Zusammenhang auch die ineffiziente Ausnutzung der erzeugten Pfade. Die Pfaderzeugung nach [FHD02b] hat zwar den Vorteil, dass die Pfade nur einmal und nicht für jedes Pixel generiert werden, aber je weiter außen die Pixel liegen, umso weniger der Pfadpunkte werden genutzt, da Pfadteile, die außerhalb des Bildes liegen, verworfen werden.

Wie bereits angesprochen, können bei der Schattenentfernung Artefakte entstehen. Die eigentliche Ursache sind Fehler im Schattenkantenbild. Lokale Fehler an der Schattenkante wirken sich aber global aus, da sie entlang der Pfade propagiert werden [FF05]. Lokale Fehler entstehen zum einen, wenn das Schattenkantenbild unvollständig ist und der Pfad an bekannter Schattenkante in den Schatten eintritt, aber an unbekannter Schattenkante wieder austritt. Durch den modifizierten Reset-Schritt (vgl. Abbildung 5.10) können Fehler abgefangen werden, aber nur, wenn diese zu große Pixelwerte verursachen. Auch wenn sich direkt an der Schattenkante verrauschte Pixelwerte befinden, werden fehlerhafte Werte entlang des Pfads weiter gereicht. Dies könnte im Endergebnis auch zu Falschfarben führen, wenn das Rauschen kanalabhängig ist. Das Verfahren impliziert, dass Schattenkanten nur innerhalb homogener Flächen auftreten, also nicht mit Materialkanten zusammenfallen. Das verwendete Verfahren zur Schattenkantendetektion (Abschnitt 4.3), findet theoretisch nur Schattenkanten, die nicht mit Materialkanten zusammenfallen. Materialkanten können aber fälschlicherweise als Schattenkanten klassifiziert werden. In diesem Fall wird die Materialkante entlang des Pfads verwischt. Um die Artefakte, die aus den verschiedenen, lokalen Schattenkantenfehlern entstehen, zu minimieren, ist die Mittelung mehrerer Pfade wichtig.

Weitere Einschränkungen folgen daraus, dass Pfade auch im Schatten starten können. Zum einen führt dies dazu, dass die Pixelwerte nach Austritt aus dem Schatten abgedunkelt werden. Um diesen Fehler auszugleichen, ist also auch wieder die Mittelung mehrerer Pfade nötig. Allerdings kann der Effekt der Abdunklung auch vorteilhaft sein, da so ein weicherer Übergang zum Schattenbereich entsteht, sodass dieser nicht so stark auffällt, selbst wenn er nicht vollständig entfernt wird. Gravierender ist, dass ein Schatten nicht richtig entfernt werden kann, solange Pfade, die im Schatten starten, zur Mittelung der Pixelwerte im Schatten beitragen.

Entscheidend für das Ergebnis der Schattenentfernung ist die Breite der Schattenkante im binären Schattenkantenbild. Wenn ein großer Halbschattenbereich vorliegt und die Schattenkante nicht den gesamten Bereich abdeckt, dann findet entlang des Pfads bei Übergang in den Kernschatten wieder eine Abdunklung statt. Die Experimente in Abschnitt 7.4.3 zeigen diese Problematik. Diese Schwierigkeit kann nicht einfach durch eine Verbreiterung der Schattenkante behandelt werden, da sonst die Gefahr besteht, dass die binäre Schattenkante den Bereich einer Materialkante einschließt. Außerdem geht die Bildinformation im Bereich der Schattenkante verloren, da dort alle Werte entlang des Pfads gleich gesetzt werden. In einer strukturreichen Szene kann eine zu breit gewählte binäre Schattenkante im Ergebnis dazu führen, dass der Bereich der Schattenkante durch den Blur-Effekt unnatürlich auffällt.

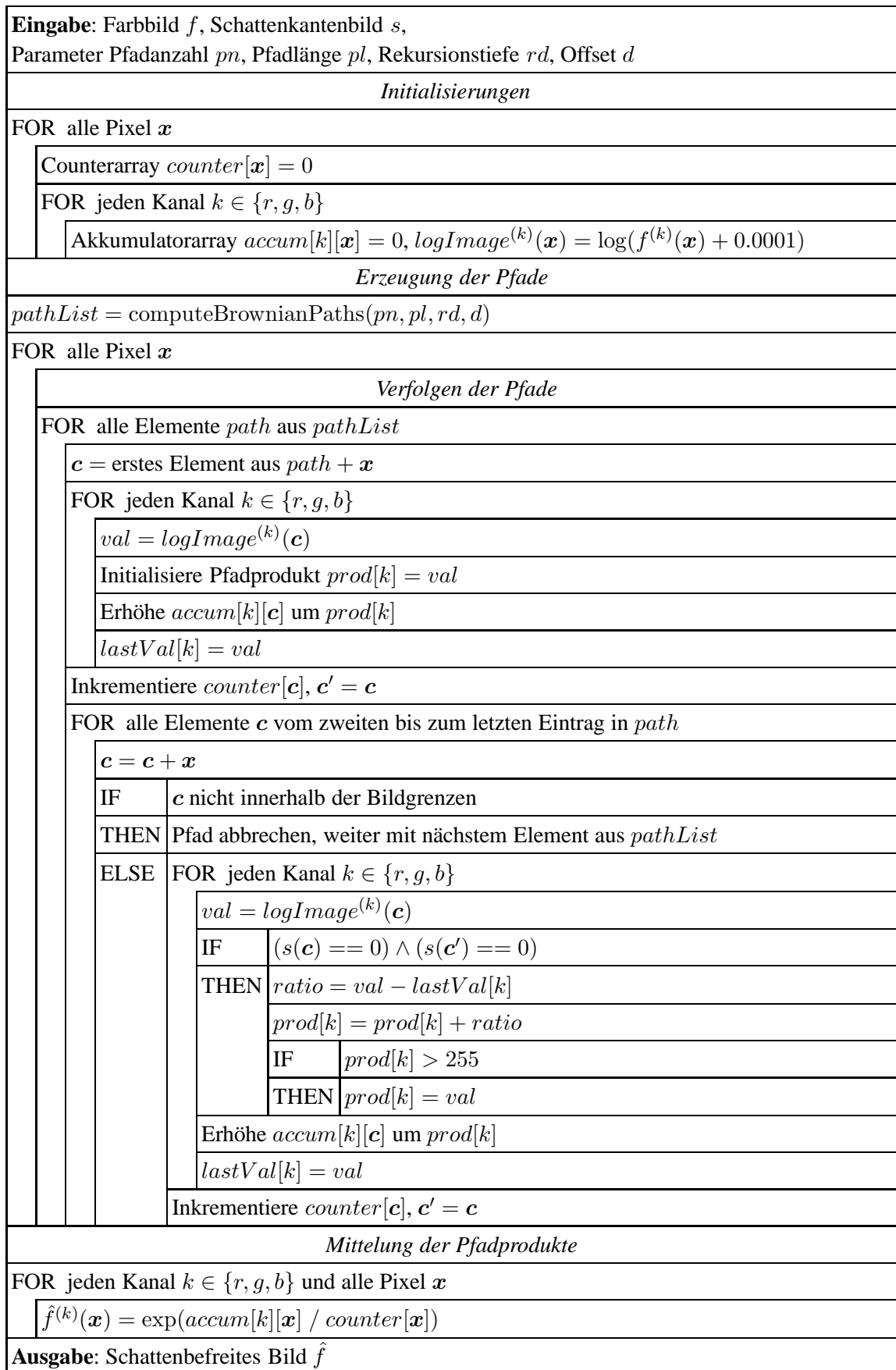


Abbildung 5.5: Struktogramm zum Algorithmus zur Schattenentfernung mit dem Retinex.

Eingabe: Parameter Pfadanzahl pn , Pfadlänge pl , Rekursionstiefe rd , Offset d	
$s = (0, 0)$	
FOR $i = 0, \dots, pn$	
<i>Erzeugen der Knotenpunkte des Pfads</i>	
Generiere gleichverteiltes 2-D Sample e im Kreis mit Radius pl	
Füge s in $pathpoints$ ein	
generateMidpoints($s, e, pathpoints, 1, rd, d$)	
Füge e in $pathpoints$ ein	
<i>Sammeln aller Pfadpunkte zwischen den Knotenpunkten</i>	
Füge s in $path$ ein	
FOR $j = 1, \dots, size(pathpoints)$	
$points = bresenham(pathpoints[j - 1], pathpoints[j])$	
FOR $k = 1, \dots, size(points)$	
Füge $points[k]$ in $path$ ein	
Füge $path$ in $pathList$ ein	
Ausgabe: $pathList$	

Abbildung 5.6: Struktogramm zum Algorithmus computeBrownianPaths zur Berechnung Brown'scher Pfade.

Eingabe: Startpunkt s , Endpunkt e , Punktliste $pathpoints$, Rekursionszähler rc , Parameter Rekursionstiefe rd , Offset d	
IF	$rc \leq rd$
THEN	Inkrementiere rc
	Generiere gleichverteiltes 2-D Sample o im Kreis mit Radius d
	$m_x = \frac{1}{2}(s_x + e_x) + o_x$
	$m_y = \frac{1}{2}(s_y + e_y) + o_y$
	generateMidpoints($s, m, pathpoints, rc, rd, d$)
	Füge mid in $pathpoints$ ein
	generateMidpoints($m, e, pathpoints, rc, rd, d$)

Abbildung 5.7: Struktogramm zum rekursiven Algorithmus generateMidpoints zur Berechnung der Knotenpunkte eines Brown'schen Pfads.

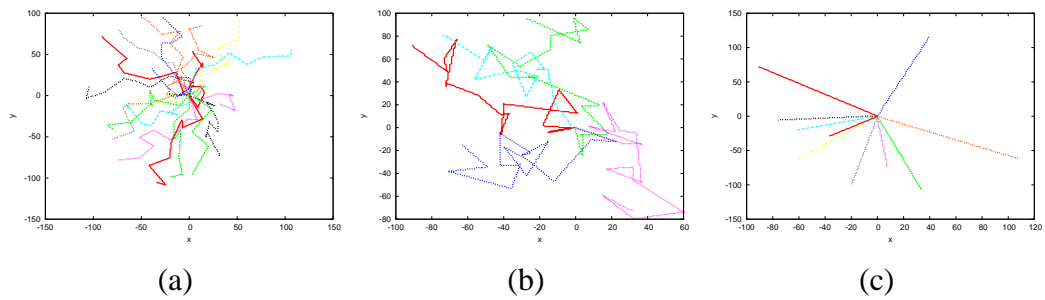


Abbildung 5.8: Brown'sche Pfade, die mit unterschiedlichen Parametern (Pfadanzahl, Pfadlänge, Rekursionstiefe, Offset) erzeugt wurden. a) 20, 128, 3, 20, b) 5, 128, 4, 30, c) 10, 128, 0, 0.

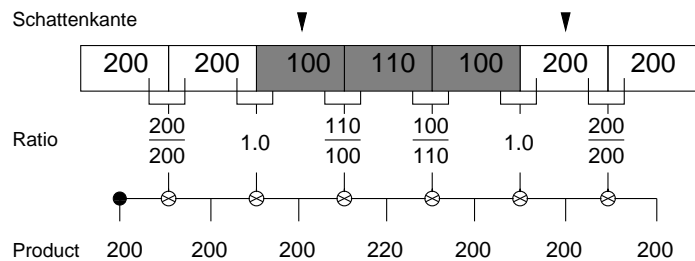


Abbildung 5.9: Schematische Darstellung eines Pixelpfads mit Schattenpixeln (grau dargestellt) zur Veranschaulichung der eigenen Umsetzung der Schatteneeliminierung. Zur Vereinfachung wird in diesem Beispiel auf nicht logarithmierten Werten gerechnet, die Werte der dargestellten Pixel entsprechen also den Pixelwerten.

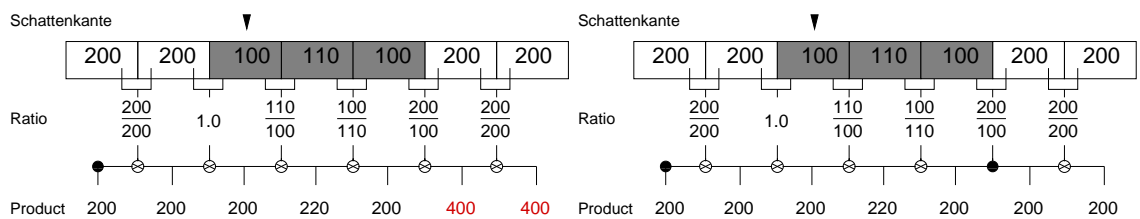


Abbildung 5.10: Links: Die fehlende Schattenkanteninformation führt zu fehlerhaften Pixelwerten (größer als der Maximalwert 255) bei Austritt aus dem Schatten. Rechts: Anwendung einer adaptierten Reset-Funktion: Wenn fehlerhafte Werte vorliegen, wird das Pfadprodukt mit dem Wert des aktuellen Pixels neu initialisiert.

Kapitel 6

Ansatz zur quantitativen Bewertung

In dieser Arbeit sollen Bewertungskriterien definiert werden, um Ergebnisse von Verfahren zur Schattenentfernung quantitativ bewerten zu können. Konkret soll dabei ein Vergleich zwischen dem in dieser Arbeit umgesetzten Verfahren von Finlayson et al. [FHD02b] und dem Verfahren von Weiss [Wei01] (s. Abschnitt 3.2) vorgenommen werden. Allerdings erwarten die beiden Verfahren nicht die gleichen Eingabedaten. Für das Verfahren von Weiss sind Bildsequenzen erforderlich. Das implementierte Verfahren benötigt als Eingabe nur ein Farbbild mit Schatten. Ein quantitativer Vergleich der beiden Verfahren ist daher nur bedingt möglich. Der folgende Abschnitt liefert zunächst einen Überblick über vorhandene Methoden zur Bewertung von Verfahren zur Schattenentfernung. Anschließend wird ein eigener Ansatz zur quantitativen Bewertung von Verfahren zur Entfernung von Schlagschatten vorgestellt. Die Problematik der Vergleichbarkeit der Verfahren von Weiss und Finlayson wird im letzten Abschnitt dieses Kapitels behandelt.

6.1 Vorschläge aus der Literatur

Beim Studium der Fachliteratur konnte ich keine quantitativen Bewertungsmaße für Verfahren zur Schattenentfernung finden. Dieser Eindruck wird auch in einer Untersuchung von Xu et al. [XQJ⁺06] bestätigt. Für Methoden, die auf der Detektion von Schattenkanten basieren [FHLD06, FHD02a, FHD02b] wird dort vorgeschlagen, einen Vergleich durch

Eingabe einer Ground-Truth Schattenkante durchzuführen. Ein Vergleich der Ergebnisse der Schattenentfernung auf Basis der Ground-Truth Schattenkante würde aber auch so nur qualitativ erfolgen.

In der Literatur wird oft nicht klar unterschieden zwischen Schattendetektion und Schattenentfernung. In [SLW06] werden zum Beispiel Metriken zur Bewertung von Verfahren zur Schattenentfernung vorgestellt, obwohl es sich im Grunde um die Bewertung von Schattendetektionsverfahren handelt. Das liegt wahrscheinlich daran, dass eine Schattendetektion im Anwendungskontext oft bereits ausreicht und somit mit Entfernung gleichgesetzt wird. Für Algorithmen zur Schattendetektion liegen bereits Evaluationsmetriken vor, die sich an Evaluationsmethoden im Bereich der Objektdetektion orientieren [XQJ⁺06]. In [PMTC03] werden z. B. die Metriken *Shadow Detection Rate* und *Shadow Discrimination Rate* eingeführt, um die Schattendetektion im Kontext der Verfolgung bewegter Objekte zu bewerten. Zur Bewertung der Schattendetektion wird auch oft so vorgegangen, dass die Ergebnisse eines Verfahrens, welches auf der Detektion von Schatten aufbaut, bewertet werden. In [SCE04] wird das zu bewertende Schattendetektionsverfahren mit einem Verfahren zur Objektdetektion kombiniert. Die Genauigkeit der Extraktion der Objekte wird mit Hilfe einer Ground-Truth Objektsegmentierung bewertet. Somit ist ein indirekter Vergleich von Schattendetektionsverfahren möglich.

Zur quantitativen Bewertung der Entfernung von Schatten konnten in der Literatur zwar keine konkreten Vorschläge gefunden werden, aber Anregungen für mögliche Bewertungsmaße. Fredembach und Finlayson [FF05] gehen auf die Problematik ein, dass Verfahren zur Schattenentfernung oft Artefakte außerhalb des Schattenbereichs verursachen. Es wird daher ein Maß vorgeschlagen, um den entstandenen Fehler quantitativ bewerten zu können. Bildbereiche außerhalb des Schattens sollen durch die Schattenentfernung nicht beeinflusst werden. Daher werden die Gradienten des Ausgangsbilds und des schattenbefreiten Bilds in diesen Bereichen verglichen. Sei $\nabla I = \left(\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y} \right)$ der Gradient von Pixeln außerhalb des Schattens im logarithmierten Originalbild I und $\nabla I'$ der Gradient dieser Pixel im berechneten logarithmierten schattenfreien Bild I' . Die Distanz d zwischen diesen Gradienten wird berechnet durch

$$d = \frac{|\nabla I - \nabla I'|}{\|\nabla I\|}, \quad (6.1)$$

mit der Notation $|\cdot - \cdot|$ für den euklidischen Abstand und $\|\cdot\|$ für die euklidische Norm. Die Distanz stellt ein Maß für die Abweichung der Gradienten der rückgerechneten Pixelwerte von den Gradienten der originalen Pixelwerte außerhalb des Schattenbereichs dar. Um die Pixel außerhalb des Schattenbereichs bestimmen zu können, werden synthetische Bilder verwendet, da dabei die Position des Schattens genau bekannt ist.

6.2 Eigener Ansatz zur Bewertung der Schattenentfernung

Der eigene Ansatz bezieht sich auf die Bewertung von Verfahren zur Entfernung von Schlagschatten. Im folgenden Abschnitt werden zunächst Anforderungen an ein solches Verfahren gesammelt. Anschließend werden Bewertungsmaße vorgestellt, anhand derer die Erfüllung der Anforderungen quantitativ bewertet werden soll.

6.2.1 Anforderungen an die Schattenentfernung

Wie gut ein Schatten entfernt wurde, hängt natürlich vom Anwendungszweck ab. Im Kontext von Segmentierung und Tracking, ist z. B. nicht entscheidend, dass das Ergebnis "schön" aussieht. Kleine Artefakte sind in diesen Anwendungsbereichen nicht so gravierend wie etwa im Kontext der Bildverbesserung. Dennoch ist von Bedeutung, dass die Strukturen in der Szene erhalten bleiben, um die weitere Verarbeitung nicht zu stören. Die hier definierten Anforderungen werden möglichst allgemein gehalten, sodass sie in verschiedenen Anwendungskontexten gültig sind. Unter Berücksichtigung der typischen Probleme, die sich bei Verfahren zur Schattenentfernung ergeben, werden folgende Anforderungen an ein Verfahren zur Schattenentfernung gestellt:

- Entfernung des Schattens.
Der Schatten und besonders die Schattenkante sollten im schattenbefreiten Bild nicht mehr erkennbar sein.
- Keine Erzeugung von Artefakten.
Die Ergebnisse von Verfahren zur Schattenentfernung [FHD02a, FHD02b, FHLD06]

zeigen oft unerwünschte Artefakte. Dies stellt ein inhärentes Problem der Verfahren dar, die wie [FHD02a, FHL06] und indirekt auch [FHD02b] auf der Nullsetzung der Gradienten im Bereich der Schattenkante und der anschließenden Reintegration der Gradienten basieren [FF05]. Ein lokaler Fehler, das Nullsetzen der Ableitung an Pixelpositionen, die nicht zu einer Schattenkante gehören, wirkt sich global aus, sodass Artefakte auch außerhalb des Schattenbereichs entstehen. Dieses Problem besteht auch bei der Schattenentfernung unter Verwendung des Retinex, wie in Abschnitt 5.2.2 bereits erläutert wurde.

- Erhaltung der Struktur im Bereich der Schattenkante.

Ein weiteres typisches Problem der gradientenbasierten Verfahren ist, dass im Bereich der Schattenkante Strukturinformationen verloren gehen, da die Gradienten in diesem Bereich auf Null gesetzt werden. Damit die Schattenkante nicht durch einen unnatürlichen Blur-Effekt auffällt, sollte die Struktur im Bereich der Schattenkante erhalten bleiben.

6.2.2 Technische Bewertungsmaße

Bei quantitativen Bewertungsverfahren ist es üblich, das zu bewertende Ergebnis mit einem Ground-Truth Ergebnis zu vergleichen [PMT03]. Hinsichtlich der beschriebenen Anforderungen soll hier geprüft werden, ob der Schatten entfernt wurde und ob die Strukturen in der Szene erhalten bleiben. Als Ground-Truth Ergebnis wird daher das Gradientenbild einer Aufnahme der jeweiligen Szene ohne Schatten verwendet.¹ Diese Aufnahme entspricht der Aufnahme, die als Eingabe für das Verfahren zur Schattenentfernung verwendet wird, außer dass kein Schatten sichtbar ist (s. Abbildung 6.1 b)). Zwischen dem schattenfreien und dem schattenentfernten Bild (s. Abbildung 6.1 c)) wird ein Gradientenvergleich in drei Bereichen vorgenommen: Der mittlere Abstand der Gradienten des Ground-Truth Bilds und der Gradienten des schattenentfernten Bilds soll im Bereich der Schattenkanten, innerhalb der Schattengrenzen und außerhalb der Schattenregionen möglichst klein sein. Abbildung 6.1 d) veranschaulicht die drei Bereiche.

¹Das Bild der Szene ohne Schatten wird im Folgenden als Ground-Truth Bild bezeichnet, der eigentliche Vergleich wird aber mit dessen Gradientenbild vorgenommen.

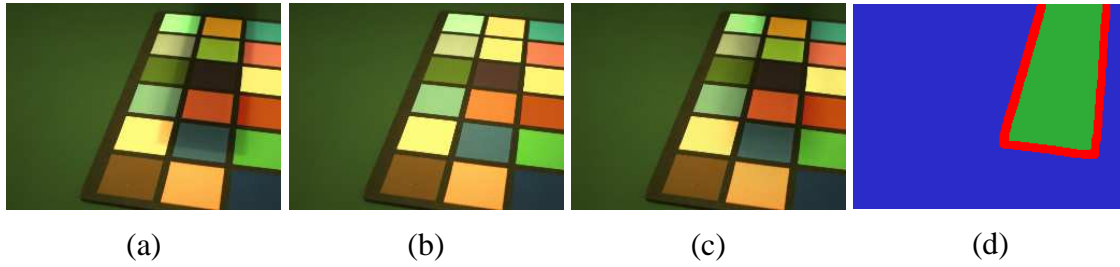


Abbildung 6.1: a) Bild mit Schatten, das als Eingabe für den Algorithmus zur Schattenentfernung verwendet wird, b) Bild derselben Szene ohne Schatten, c) schattenbefreites Bild, d) Veranschaulichung der drei Bereiche in denen die Gradientenabstände des schattenbefreiten und des schattenfreien Bilds verglichen werden, rot: Schattenkantenbereich, grün: Region innerhalb der Schattengrenzen, blau: Region außerhalb der Schattengrenzen.

Das in Gleichung 6.1 vorgestellte Abstandsmaß [FF05] ergibt immer den Wert 1, wenn der Gradient des schattenbefreiten Bilds Null ist. Somit wird in diesem Fall für verschiedene Gradienten im Ground-Truth Bild derselbe Abstand berechnet. Hier wird daher der euklidische Abstand ohne Normierung verwendet.

Gegeben seien das Ground-Truth Bild f_{gt} der Szene ohne Schatten und das schattenbefreite Bild \hat{f} . Der mittlere Abstand der Gradienten an Pixelposition (x, y) berechnet sich aus der Mittelung der euklidischen Gradientenabstände in jedem Kanal:

$$d(f_{\text{gt}}, \hat{f})(x, y) = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 (|\nabla f_{\text{gt}}^{(k)}(x, y) - \nabla \hat{f}^{(k)}(x, y)|), \quad (6.2)$$

mit $\nabla f_{\text{gt}}^{(k)}(x, y) = \left(\frac{\partial f_{\text{gt}}^{(k)}(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial f_{\text{gt}}^{(k)}(x, y)}{\partial y} \right)$. Der mittlere Gradientenabstand $d(f_{\text{gt}}, \hat{f})$ ergibt sich aus der Mittelung der Gradientenabstände über alle Pixel:

$$d(f_{\text{gt}}, \hat{f}) = \frac{1}{MN} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} d(f_{\text{gt}}, \hat{f})(x, y), \quad (6.3)$$

dabei ist MN die Anzahl der Pixel.

Gegeben seien zwei Binärbilder als Ground-Truth Schatteninformation: $S_e(x, y)$ hat im Bereich der Schattenkante und $S_r(x, y)$ für alle Pixel innerhalb von Schattengrenzen den



Abbildung 6.2: Binäre Ground-Truth Schattenbilder. Links: $S_e(x, y)$, repräsentiert den Bereich der Schattenkante, rechts: $S_r(x, y)$ repräsentiert Pixel innerhalb von Schattengrenzen.

Wert 1, sonst den Wert 0 (s. Abbildung 6.2). Die Anzahl der Schattenkantenpixel sei n_e , der Pixel innerhalb der Schattengrenzen n_i und die der Pixel außerhalb des Schattens n_o . Es ergeben sich 3 Maße, die mittleren Gradientenabstände im Bereich der Schattenkante d_e , im Bereich innerhalb der Schattengrenzen d_i und außerhalb der Schattengrenzen d_o :

$$d_e(f_{\text{gt}}, \hat{f}) = \frac{1}{n_e} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} d(f_{\text{gt}}, \hat{f})(x, y) S_e(x, y) \quad (6.4)$$

$$d_i(f_{\text{gt}}, \hat{f}) = \frac{1}{n_i} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} d(f_{\text{gt}}, \hat{f})(x, y) S_r(x, y) \quad (6.5)$$

$$d_o(f_{\text{gt}}, \hat{f}) = \frac{1}{n_o} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} d(f_{\text{gt}}, \hat{f})(x, y) (1 - S_e(x, y)) (1 - S_r(x, y)) \quad (6.6)$$

Das Maß d_e soll eine Aussage darüber liefern, wie gut der Schatten entfernt wurde. Je stärker die Schattenkante im schattenbefreiten Bild noch vorhanden ist, umso größer wird der Wert. Das Maß wird aber auch davon beeinflusst, ob die Struktur im Bereich der Schattenkante erhalten bleibt und ob Artefakte innerhalb des Bereichs der Schattenkante auftreten. Anhand des Maßes d_i soll zum einen geprüft werden können, wie gut der Schatten entfernt wurde und ob im Schattenbereich Artefakte entstanden sind. Das Maß d_o soll aussagen, ob außerhalb des Schattens Artefakte erzeugt wurden. Je größer der Wert, umso stärker wurden die Strukturen außerhalb des Schattens verfälscht.

Bei den ersten beiden Maßen besteht das Problem, dass sie sowohl von der Schattenentfernung als auch von der Erzeugung von Artefakten beeinflusst werden. Bei den Experimenten ergab sich auch, dass die Wertebereiche der Maße wenig intuitiv sind. Um ein

intuitiveres Maß zu erhalten und um verschiedene Ergebnisse besser miteinander vergleichen zu können, werden im Folgenden Referenzwerte mit einbezogen.

Sei f das Bild mit Schatten, das als Eingabe zur Schattenentfernung verwendet wird (s. Abbildung 6.1 a)). Die Referenzwerte sind die mittleren Gradientenabstände

$$d_{e_{\text{ref}}} = d_e(f_{\text{gt}}, f) \quad (6.7)$$

$$d_{i_{\text{ref}}} = d_i(f_{\text{gt}}, f) \quad (6.8)$$

$$d_{o_{\text{ref}}} = d_o(f_{\text{gt}}, f) \quad (6.9)$$

zwischen dem Schattenbild und dem Ground-Truth Bild der Szene ohne Schatten. Für den Bereich außerhalb des Schattens würde man theoretisch einen Gradientenabstand von Null erwarten. Wenn keine synthetischen Bilder sondern Kameraaufnahmen verwendet werden, entstehen aber durch Rauschen auch außerhalb des Schattens Unterschiede in den Gradienten der Aufnahme ohne und mit Schatten. Anhand der Referenzwerte kann die prozentuale Abweichung der Gradientenabstände berechnet werden:

$$\Delta_e(f_{\text{gt}}, \hat{f}) = \frac{d_e(f_{\text{gt}}, \hat{f}) - d_{e_{\text{ref}}}}{d_{e_{\text{ref}}}} \cdot 100\% \quad (6.10)$$

$$\Delta_i(f_{\text{gt}}, \hat{f}) = \frac{d_i(f_{\text{gt}}, \hat{f}) - d_{i_{\text{ref}}}}{d_{i_{\text{ref}}}} \cdot 100\% \quad (6.11)$$

$$\Delta_o(f_{\text{gt}}, \hat{f}) = \frac{d_o(f_{\text{gt}}, \hat{f}) - d_{o_{\text{ref}}}}{d_{o_{\text{ref}}}} \cdot 100\% \quad (6.12)$$

Die prozentuale Abweichung zeigt, um wieviel Prozent die Referenz-Gradientenabstände erniedrigt oder erhöht wurden. Eine negative Abweichung bedeutet eine Verringerung, eine positive Abweichung eine Erhöhung des mittleren Gradientenabstands im jeweiligen Bereich. Das Optimum wäre jeweils eine prozentuale Abweichung von -100% . In diesem Fall wäre der mittlere Gradientenabstand $d(f_{\text{gt}}, \hat{f})$ Null. Anhand der prozentualen Abweichungsmaße soll eine dediziertere Aussage hinsichtlich Schattenentfernung und Artefakterzeugung durch die ersten beiden Maße ermöglicht werden. Eine negative Abweichung zeigt, wie gut der Schatten entfernt wurde, eine positive Abweichung zeigt, dass starke Artefakte in diesem Bereich entstanden sind. Eine Bewertung der Entfernung des Schattens ist dann nicht mehr möglich. Eine positive Abweichung außerhalb des Schattens zeigt, dass Artefakte entstanden sind. Eine negative Abweichung ist nicht zu erwarten, da das

Rauschen des Eingabebilds auch das schattenbefreite Bild betrifft. In Abschnitt 7.4 wird untersucht, inwieweit anhand der Maße eine Bewertung und ein Vergleich von Ergebnissen erfolgen kann.

Die Artefakte bei der Schattenentfernung werden bei Verfahren, die auf der Detektion von Schattenkanten aufbauen [FHD02a, FHD02b, FHLD06], durch Fehler im Schattenkantenbild verursacht. Das Ergebnis der Schattenentfernung ist also abhängig von der Schatten-detektion, sodass anhand der Maße die gesamte Verarbeitungskette des jeweiligen Verfahrens bewertet wird. Durch den Austausch einzelner Arbeitsschritte, wie zum Beispiel der Detektion von Schattenkanten, kann anhand des Vergleichs der Ergebnisse, die Leistung des jeweiligen Arbeitsschritts bewertet werden.² So wird bei den Experimenten in Abschnitt 7.4 auch der Einfluss verschiedener Parameterbelegungen untersucht. Um nur die eigentliche Schattenentfernung zu bewerten, wird ein Ground-Truth Schattenkantenbild als Eingabe verwendet. In diesem Fall können auch die ersten beiden Maße zuverlässigere Aussagen liefern.

Die beschriebenen Maße können nur berechnet werden, wenn die genannten Ground-Truth Daten vorliegen. Da eine Aufnahme der Szene ohne Schatten benötigt wird, ist die Erzeugung der Daten nur durch Simulation oder durch kontrollierte Aufnahmen möglich. In Abschnitt 7.4.1 wird beschrieben, wie die benötigten Daten im Labor erzeugt werden können.

Einschränkungen Eine Skalierung der Pixelwerte hat einen Einfluss auf die vorgestellten differentiellen Bewertungsmaße. Dies kann den Vergleich von Verfahren zur Schattenentfernung beeinträchtigen: Verfahren, die auf der Reintegration von Kantenbildern basieren und dabei mit logarithmierten Bildwerten rechnen [FHD02a, FHLD06], können die Pixelwerte z. B. nur bis auf eine multiplikative Konstante wiederherstellen. Dieser Skalierungsfaktor führt zu einer Abweichung der Gradienten. Wenn auf nicht logarithmierten Bildwerten gerechnet wird, entsteht ein additiver Offset der Pixelwerte. Dieser hat keinen Einfluss auf die Maße. Dieser Aspekt muss beim Vergleich von Verfahren berücksichtigt werden. Wenn nicht erwünscht ist, dass die Maße durch eine multiplikative Reintegrationskonstante beeinflusst werden, können die Gradienten z. B. auf den logarithmierten

²Ähnlich wird in [SCE04] zur Evaluation der Schattendetektion verfahren.

Eingabebildern berechnet werden, wie auch in [FF05] bei der Berechnung des Gradientenabstands (Gleichung 6.1) verfahren wird.

Bei der eigenen Umsetzung der Schattenentfernung mit dem Retinex wird keine Skalierung der Pixelwerte vorgenommen. Aber bei der Implementierung des Verfahrens von Weiss werden die Werte am Ende linear auf den darstellbaren Bereich skaliert. Diese Skalierung hat, wie die Experimente in Abschnitt 7.4 zeigen, einen starken Einfluss auf die Bewertungsmaße. Für den quantitativen Vergleich der Verfahren wurde der MATLAB-Code von Weiss daher so angepasst, dass keine Skalierung stattfindet.

6.2.3 Bewertung des Verfahrens von Weiss

Zur Berechnung der Bewertungsmaße wird die Information über die Ground-Truth Schattenkanten- und inneren Schattenregionenpixel benötigt. Beim Verfahren von Weiss gibt es aber nicht eine bestimmte (Ground-Truth) Position des Schattens, sondern der Schatten befindet sich bei jedem Eingabebild an einer anderen Position. Es gibt also mehrere Ground-Truth Schattenpositionen. Um das Verfahren von Weiss, oder im Allgemeinen Verfahren, die aus Bildsequenzen eine schattenfreie Darstellung berechnen, anhand der beschriebenen Maße zu bewerten, wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen.

Zu jedem der n Eingabebilder seien die Ground-Truth Schattenbilder $S_{e_i}(x, y)$ und $S_{r_i}(x, y)$, $i = 1, \dots, n$ gegeben. Aus den n Ground-Truth Schattenbildern werden ein Schattenkanten- und ein Schattenregionenbild kombiniert (s. Abbildung 6.3):

$$S_{e_c}(x, y) = S_{e_1}(x, y) \vee \dots \vee S_{e_n}(x, y) \quad (6.13)$$

$$S_{r_c}(x, y) = (S_{r_1}(x, y) \vee \dots \vee S_{r_n}(x, y)) \wedge (\neg S_{e_c}(x, y)). \quad (6.14)$$



Abbildung 6.3: Aus den vier Schattenbildern links ergeben sich das kombinierte Ground-Truth Schattenkantenbild und das kombinierte Ground-Truth Schattenregionenbild rechts.

Die mittleren Gradientenabstände d_{ec} , d_{ic} und d_{oc} werden analog zu Gleichung 6.4 bis 6.6 berechnet:

$$d_{ec}(f_{gt}, \hat{f}) = \frac{1}{n_e} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} d(f_{gt}, \hat{f})(x, y) S_{ec}(x, y) \quad (6.15)$$

$$d_{ic}(f_{gt}, \hat{f}) = \frac{1}{n_i} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} d(f_{gt}, \hat{f})(x, y) S_{rc}(x, y) \quad (6.16)$$

$$d_{oc}(f_{gt}, \hat{f}) = \frac{1}{n_o} \sum_{y=0}^{N-1} \sum_{x=0}^{M-1} d(f_{gt}, \hat{f})(x, y) (1 - S_{ec}(x, y)) (1 - S_{rc}(x, y)) \quad (6.17)$$

Durch dieses Vorgehen werden bei der Bewertung also alle Schattenpositionen zusammen berücksichtigt, um die mittleren Gradientenabstände zum Ground-Truth Bild der Szene zu berechnen. Die Berechnung von Referenzwerten, analog zu Gleichung 6.7 bis 6.9, ist hier nicht möglich, da kein Schattenbild vorliegt, das alle Schatten gleichzeitig enthält.

6.2.4 Vergleich der Verfahren

Wie eingangs angesprochen, ist ein Vergleich des Verfahrens von Weiss mit dem nach Finlayson umgesetzten Verfahren anhand der Bewertungsmaße aufgrund der verschiedenen Eingabedaten nur bedingt möglich. Im Folgenden werden zwei mögliche Vorgehensweisen zum Vergleich vorgeschlagen. Deren Umsetzung wird auch anhand von Experimenten in Abschnitt 7.4 vorgestellt.

- 1) Angenommen eine Sequenz, wie sie vom Verfahren von Weiss erwartet wird, ist gegeben. Das Ziel ist, zu bewerten, welches Verfahren auf Basis dieser Sequenz das bessere

schattenfreie Ergebnis liefert. Dazu wird das Ergebnis von Weiss, \hat{f}_W , berechnet, sowie zu allen n Bildern der Sequenz die Ergebnisse des Verfahrens von Finlayson, \hat{f}_{F_i} , mit $i = 1, \dots, n$. Anhand der gegebenen Ground-Truth Schattenbilder $S_{e_i}(x, y)$ und $S_{r_i}(x, y)$ werden zu dem Ergebnis von Weiss die mittleren Gradientenabstände d_{e_c} , d_{i_c} und d_{o_c} berechnet. Aus den Ergebnissen \hat{f}_{F_i} wird das beste \hat{f}_{F_m} ausgewählt. Dazu werden die mittleren Gradientenabstände d_i (Gleichung 6.3) bestimmt. Das beste Ergebnis ist das mit dem kleinsten mittleren Gradientenabstand d_m . Zum gewählten Ergebnis werden die mittleren Gradientenabstände d_{e_m} , d_{i_m} , d_{o_m} berechnet. Für einen Vergleich können diese als Referenzwerte verwendet werden, um die prozentuale Abweichung der Gradientenabstände von Weiss von diesen Gradientenabständen zu berechnen: Δ_{WF_e} , Δ_{WF_i} , Δ_{WF_o} . Die Berechnung ist analog zu Gleichung 6.10 bis 6.12:

$$\Delta_{WF_e}(\hat{f}_{F_m}, \hat{f}_W) = \frac{d_{e_c} - d_{e_m}}{d_{e_m}} \cdot 100\% \quad (6.18)$$

$$\Delta_{WF_i}(\hat{f}_{F_m}, \hat{f}_W) = \frac{d_{i_c} - d_{i_m}}{d_{i_m}} \cdot 100\% \quad (6.19)$$

$$\Delta_{WF_o}(\hat{f}_{F_m}, \hat{f}_W) = \frac{d_{o_c} - d_{o_m}}{d_{o_m}} \cdot 100\% \quad (6.20)$$

So kann verglichen werden, um wieviel Prozent die Gradientenabstände des Ergebnisses von Weiss von den Gradientenabständen des Ergebnisses der Umsetzung nach Finlayson abweichen.

2) Für Verfahren, die auf der Detektion von Schattenkanten basieren, kann ein Ground-Truth Schattenkantenbild verwendet werden, um nur die eigentliche Schattenentfernung zu bewerten. Bei Weiss liegen die Schattenkanten nicht explizit als Zwischenergebnis vor. Die Ableitungen der Schattenkanten werden nicht wie bei [FHD02a, FHL06] und implizit auch bei der Anwendung des Retinex [FHD02b] auf Null gesetzt, sondern ergeben sich als der Median der Ableitungen mehrerer Bilder einer Sequenz. Durch die natürlichen Werte in der Ableitungsdarstellung kommt es nicht zur Erzeugung von Artefakten bei der Reintegration. Die "Detektion" der Schattenkanten ist essentieller Bestandteil des Verfahrens zur Schattenentfernung von Weiss. Wenn man aber nur den Teil der Reintegration beim Verfahren von Weiss betrachtet, kann ein Vergleich mit dem Verfahren zur Schattenentfernung mit dem Retinex vorgenommen werden.

Gegeben sei eine Aufnahme mit Schatten f und das Ground-Truth Schattenkantenbild s_{gt} .³ Anstelle der Mediankantenbilder kann dieses wie in [FHLD06] verwendet werden, um ein Kantenbild von f zu erzeugen, das keine Schattenkanten enthält. Anhand einer Schwellwertfunktion werden alle Gradienten $\nabla_i f(\mathbf{x})$, $i \in \{x, y\}$, im Bereich der Schattenkante auf Null gesetzt:

$$\Theta(\nabla_i f(\mathbf{x}), s_{\text{gt}}(\mathbf{x})) = \begin{cases} 0, & \text{für } s_{\text{gt}}(\mathbf{x}) = 1 \\ \nabla_i f(\mathbf{x}), & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.21)$$

Analog zu Gleichung 3.6 in Abschnitt 3.2 werden die Ableitungen der modifizierten Gradientenbilder berechnet und summiert, sodass sich die Poisson Gleichung

$$\nabla^2 \hat{f}_W(\mathbf{x}) = \nabla_x(\Theta(\nabla_x f(\mathbf{x}), s_{\text{gt}}(\mathbf{x})) + \nabla_y(\Theta(\nabla_y f(\mathbf{x}), s_{\text{gt}}(\mathbf{x}))) \quad (6.22)$$

ergibt. Um das schattenfreie Bild \hat{f}_W zu berechnen, wird diese Gleichung, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, durch Reintegration gelöst. Neben den genannten Anpassungen waren in der MATLAB-Implementierung von Weiss also keine weiteren Änderungen erforderlich.

Unter Verwendung des Ground-Truth Schattenkantenbilds s_{gt} wird durch Schattenentfernung mit dem Retinex das schattenfreie Bild \hat{f}_F berechnet. Ein Vergleich der beiden Ergebnisse \hat{f}_F und \hat{f}_W kann anhand des Maßes der prozentualen Abweichung der Gradientenabstände (Gleichung 6.10 bis 6.12) erfolgen.

³Das binäre Schattenkantenbild s_{gt} unterscheidet sich von S_e darin, dass es nur Schattenkantenpixel enthält, die nicht mit Materialkanten zusammenfallen.

Kapitel 7

Experimente und Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die im Laufe der Diplomarbeit durchgeführten Experimente und deren Ergebnisse vorgestellt. Abschnitt 7.1 liefert zunächst Informationen über die beiden verwendeten Kameras und vorhandenes Bildmaterial. In Abschnitt 7.2 wird die Kalibrierung der Kameras behandelt. Bei der Netzwerkkamera wird auch auf die Ergebnisse des alternativen Verfahrens der Entropieminimierung eingegangen. In Abschnitt 7.3 und 7.4 wird untersucht, welche Ergebnisse sich mit dem Verfahren von Weiss [Wei01] (s. Abschnitt 3.2) und mit dem in dieser Arbeit nach Finlayson et al. [FHD02b, FHD02a] umgesetzten und angepassten Verfahren erzielen lassen. Abschnitt 7.3 liefert zunächst eine qualitative Bewertung der Verfahren bei Anwendung auf die Campusbildsequenzen der Netzwerkkamera. In Abschnitt 7.4 wird die Umsetzung der quantitativen Bewertung der Verfahren anhand der beschriebenen Bewertungsmaße und kontrollierter Laboraufnahmen erläutert. Dabei wird auch untersucht, inwieweit die Bewertungsmaße einen Vergleich von Ergebnissen der Schattenentfernung ermöglichen.

7.1 Kameras und Bildmaterial

Der Einsatz der Verfahren wurde zunächst an vorhandenen Campusbildsequenzen erprobt. Die verwendete Kamera ist eine AXIS 200+ CCD Netzwerk-Farbkamera von AXIS Communications. Die Bilder liegen komprimiert im JPEG-Format vor und haben eine Auflö-

sung von 352 x 288 Pixeln. Die für die Campusaufnahmen gewählten Einstellungen der Kamera sind im Anhang in Tabelle B.1 aufgelistet. Bei der Kalibrierung der Kamera wurden dieselben Einstellungen verwendet.

Die Bildsequenzen dokumentieren die Entstehung des Universitäts-Campus in Koblenz. Mit der außen am Gebäude befestigten Kamera wurden von August 1999 bis August 2003 täglich um 12 Uhr Aufnahmen erstellt. Die Kamera war auf einer Schwenk-Neige-Einrichtung montiert, sodass jeweils aus 52 bestimmten Positionen Aufnahmen entstanden sind. Insgesamt liegen also 52 Sequenzen vor, die jeweils einen bestimmten Campusausschnitt zeigen. Die Bilder der Sequenzen sind nicht registriert. Für die qualitative Bewertung der Verfahren zur Schattenentfernung wurden aus der großen Datenmenge 14 Sequenzen aus dem Jahr 2003 herausgegriffen. Das Verfahren von Weiss erwartet eine statische Szene. Diese Voraussetzung ist aufgrund von Jahreszeitenwechsel und bewegten Objekten auf dem Campus nicht gegeben. Die Sequenzen wurden daher nochmals so in Untersequenzen mit je 5 Bildern unterteilt, dass diese, wenn möglich, nur vereinzelt bewegte Objekte und keine kontinuierlichen Änderungen des Szeneninhalts (wie z. B. das Wachsen von Laub) enthalten. Teilweise sind aber noch permanente Bewegungen, wie das Schwanken von Bäumen im Wind, enthalten. In jeder Sequenz ist außerdem eine leichte permanente Bewegung der Szene gegeben, weil die Bilder nicht registriert sind. Für das Verfahren von Weiss wurden so insgesamt 36 Sequenzen mit je 5 Bildern extrahiert, die jeweils einen bestimmten Campusausschnitt mit wechselnden Beleuchtungsverhältnissen zeigen. In Abbildung C.1 sind exemplarisch 5 Sequenzen dargestellt. Um das Verfahren von Finlayson zu testen, wurden aus den 14 Grundsequenzen jeweils 5 verschiedene Bilder mit Schlagschatten, also insgesamt 70 Bilder, ausgewählt.

Für die Experimente zur quantitativen Bewertung der Verfahren wurden kontrollierte Aufnahmen im Labor erstellt. Hierzu wurde die CCD Firewire Farbkamera DFK31BF03 von The Imaging Source gewählt. Diese Kamera wurde eingesetzt, da sie unkomprimierte Bilder im PPM-Format liefert. Außerdem können automatische, kamerainterne Verarbeitungen deaktiviert werden, sodass das Bildentstehungsmodell, von dem beide Verfahren ausgehen, besser erfüllt wird. Bei den Aufnahmen für die Kalibrierung und die Laborexperimente wurden dieselben Einstellungen verwendet, wobei insbesondere die automatische Belichtung, der automatische Weißabgleich, sowie die Gamma-Korrektur ausgeschaltet



Abbildung 7.1: Zwei Farbbilder der Netzwerkkamera und rechts daneben jeweils das zugehörige, durch Entropieminimierung berechnete, invariante Grauwertbild.

wurden. Im Anhang sind in Tabelle B.2 die genauen Einstellungen aufgelistet. Die Kamera liefert Bilder in der Auflösung 1024 x 768 Pixel. Für die Durchführung der Experimente wurden diese auf die Größe 256 x 192 Pixel skaliert. Damit keine neuen Farben entstehen, wurde die Skalierung ohne Interpolation vorgenommen. Die Erzeugung der Laboraufnahmen wird in Abschnitt 7.4 behandelt.

7.2 Kalibrierung des invarianten Winkels

7.2.1 Netzwerkkamera

Die invarianten Darstellungen der 70 ausgewählten Campusbilder wurden zunächst mit dem Verfahren der Entropieminimierung (Abschnitt 4.2.1) berechnet. Dabei ergaben sich starke Unterschiede im Wert des invarianten Winkels α . Im Mittel beträgt der Winkel $65,4^\circ$, die Standardabweichung ist mit $19,67^\circ$ sehr hoch. Da der Winkel eine kameraspezifische Eigenschaft beschreibt, sollte sich immer annähernd der gleiche Wert ergeben. Außerdem sind auf einigen der invarianten Grauwertbilder die Schattenbereiche noch deutlich erkennbar, oder auch Materialkanten sind in der invarianten Darstellung nicht mehr sichtbar, wie in Abbildung 7.1 dargestellt. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die Kamera aufgrund der kamerainternen Verarbeitung (JPEG-Kompression, Weißabgleich) die Annahmen des Verfahrens zur Berechnung der invarianten Darstellung nicht erfüllt und der erwartete lineare Zusammenhang von Log-Chromatizitäts-Koordinaten nicht gegeben ist. Um dies festzustellen, wurde eine Kalibrierung durchgeführt.

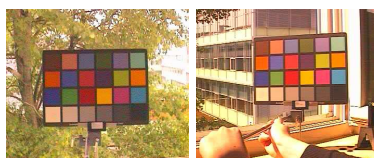


Abbildung 7.2: Aufnahmen des Macbeth ColorChecker® bei Tageslicht.

Kalibrierung	Lichtquellen	α	$\bar{\sigma}^2$
1	A, D65, HL100, KBL, HL400, 3 WGB	30,8°	0,01207620
2	A, 3 WGB	30,9°	0,00186468
3	9 Tageslicht, D65	30,3°	0,00644442

Tabelle 7.1: Ergebnisse von drei Kalibrierungen der Netzwerkkamera.

Für die Kalibrierung wurden zunächst, wie in Abschnitt 4.2.2 beschrieben, Aufnahmen des Macbeth ColorChecker® unter Verwendung der folgenden Lichtquellen erstellt: Die CIE Standardlichtarten A und D65, die Halogenstrahler von 100 und 400 Watt (Abk. HL100, HL400), die Kohlebogenlampe (Abk. KBL) und acht Dimmstufen der 100 Watt Glühbirne (Abk. WGB). Bei niedrigen Dimmstufen ergaben sich stark verrauschte Bilder. Daher wurden für die Kalibrierung nur drei Dimmstufen verwendet. Da es sich bei den Campusbildern um Außenaufnahmen handelt, wurden zum Vergleich zusätzlich Aufnahmen bei Tageslicht erstellt. Da die Netzwerkkamera nicht einfach im Freien einsetzbar ist, wurde sie vor dem geöffneten Fenster platziert und der ColorChecker® außerhalb des Fensters positioniert. Von 8:15 Uhr bis 20:00 Uhr wurden unter verschiedenen Bedingungen (z. B. sonnig, bedeckt) 16 Aufnahmen erstellt. Abbildung 7.2 zeigt beispielhafte Aufnahmen. Da auch hier das Bildrauschen teilweise sehr hoch war, wurden nur neun der Aufnahmen verwendet.

Anhand der erstellten Aufnahmen wurden drei Kalibrierungen durchgeführt. Tabelle 7.1 listet für jede Kalibrierung die verwendeten Aufnahmen beziehungsweise Lichtquellen auf, sowie den kalibrierten Winkel α und den Anpassungsfehler $\bar{\sigma}^2$. Bei allen drei Kalibrierungen ergibt sich ein Winkel zwischen 30° und 31°. In Abbildung 7.3 sind für die ersten beiden Kalibrierungen die Koordinaten der Farbfelder im Geometric Mean 2-D Chroma-

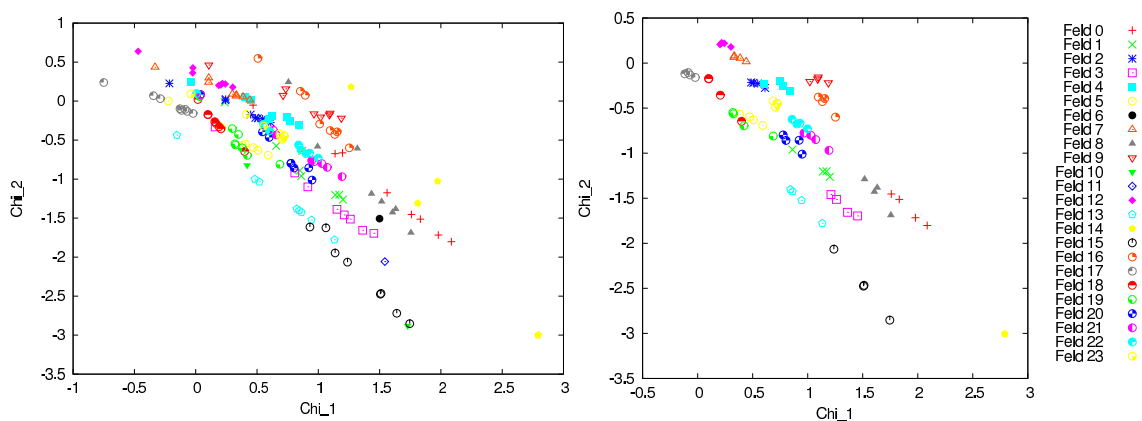


Abbildung 7.3: Geometric Mean 2-D Chromatizitäts-Koordinaten der Farbfelder. Links: Kalibrierung 1 der Netzwerkkamera. Rechts: Kalibrierung 2. Die Farbfelder sind zeilenweise von links oben nach rechts unten nummeriert (s. Abbildung 4.5).

tizitäts-Raum dargestellt. In beiden Fällen ist der lineare Zusammenhang der Punkte eines Farbfelds gut erkennbar. Abbildung 7.4 veranschaulicht die aus dem jeweiligen kalibrierten Winkel resultierenden invarianten Werte der Farbfelder. Für jedes Farbfeld ist der invariante Wert dargestellt, der sich für die Aufnahme bei einer bestimmten Beleuchtung ergibt. Besonders bei der Kalibrierung unter Einsatz der Glühbirne, ist die Annahme erfüllt, dass gleiche Farbfelder unter verschiedenen Beleuchtungen auf einen annähernd gleichen Wert abgebildet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Kamera grundsätzlich für das Verfahren geeignet ist. Allerdings liegen die Punkte verschiedener chromatischer Farbfelder in Abbildung 7.3 teilweise annähernd auf derselben Gerade. Somit werden verschiedene chromatische Farbfelder auf ähnliche invariante Werte abgebildet. Dies ist problematisch im Zusammenhang mit der Schattenkantendetektion. In Abschnitt 7.3 werden die Ergebnisse untersucht, die sich mit dem durch Kalibrierung 3 bestimmten Winkel von 30° erzielen lassen.

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass eine Kalibrierung mit künstlichen Lichtquellen geeignet ist, um den invarianten Winkel zu ermitteln. Für Kalibrierung 2 wurden nur drei Dimmstufen der Glühbirne und die Standardlichtart A verwendet. Der Winkel weicht nur um $0,6^\circ$ von dem anhand der Tageslichtaufnahmen kalibrierten Winkel ab. Der Vorteil bei der Kalibrierung mit der Glühbirne ist der deutlich geringere Aufwand.

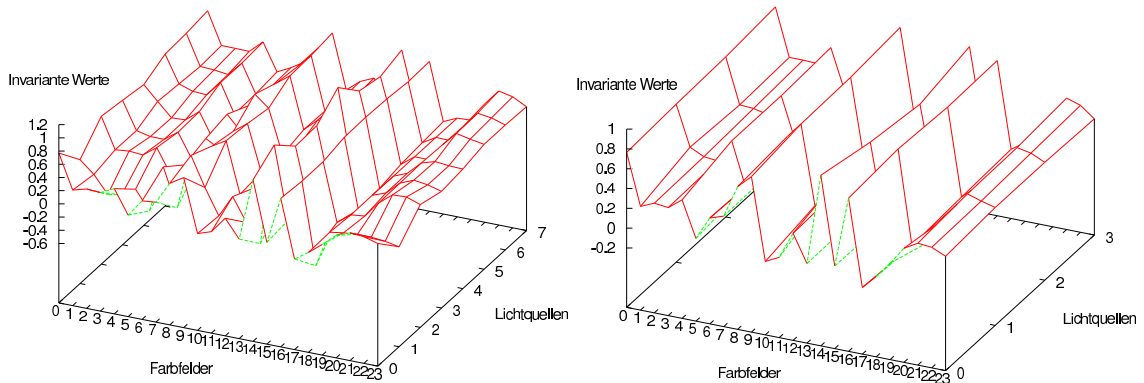


Abbildung 7.4: Invariante Werte der Farbfelder unter verschiedenen Beleuchtungen. Links: Kalibrierung 1 der Netzwerkkamera. Rechts: Kalibrierung 2. Die Nummerierung der Lichtquellen entspricht der Reihenfolge der Lichtquellen in Tabelle 7.1.

Kalibrierung	Lichtquellen	α	$\bar{\sigma}^2$
1	A, D65, HL400, 6 WGB	59,1°	0,00802343
2	A, HL400, 6 WGB	57,0°	0,00297105
3	A, 6 WGB	60,2°	0,00077658

Tabelle 7.2: Ergebnisse von drei Kalibrierungen der Firewire Kamera.

7.2.2 Firewire Kamera

Für die Kalibrierung der Firewire Kamera wurden folgende Lichtquellen verwendet: Die CIE Standardlichtarten A und D65, der Halogenstrahler von 400 Watt und sechs Dimmstufen der 100 Watt Glühbirne.

Tabelle 7.2 zeigt die Ergebnisse von drei Kalibrierungen. Die Winkel weichen maximal um 3,2° voneinander ab. Bei allen drei Kalibrierungen besteht der benötigte lineare Zusammenhang der Koordinaten der Farbfelder im Geometric Mean 2-D Chromatizitäts-Raum. Abbildung 7.5 zeigt dies exemplarisch für die zweite und dritte Kalibrierung. Abbildung 7.6 veranschaulicht die aus den jeweiligen Winkeln resultierenden invarianten Werte der Farbfelder unter den verschiedenen Beleuchtungen. Der Vergleich der Ergeb-

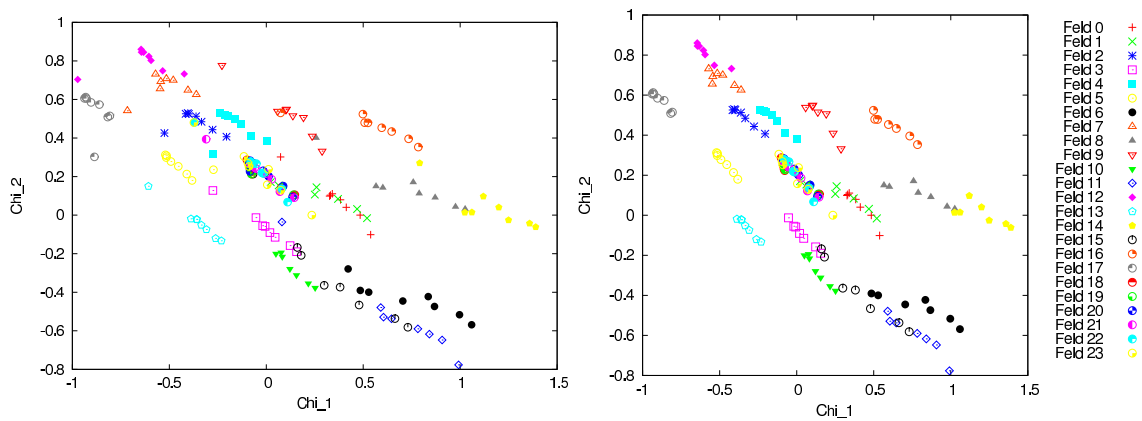


Abbildung 7.5: Geometric Mean 2-D Chromaticitäts-Koordinaten der Farbfelder. Links: Kalibrierung 2 der Firewire Kamera. Rechts: Kalibrierung 3.

nisse zeigt, dass die Beleuchtung durch den Halogenstrahler (Beleuchtung 1 links in Abbildung 7.6) Ausreißer verursacht. Der kalibrierte Winkel von $57,0^\circ$ wurde dennoch für die Laborexperimente verwendet, da bei den kontrollierten Laboraufnahmen der Halogenstrahler und die 100 Watt Glühbirne eingesetzt wurden. Bei der Kalibrierung mit der Glühbirne und Standardlichtart A ergibt sich erwartungsgemäß wieder der kleinste Anpassungsfehler. Dieser ist kleiner als bei der Kalibrierung der Netzwerkkamera mit diesen Lichtquellen. Die Kamera erfüllt die Annahmen des Verfahrens zur Berechnung der invarianten Darstellung somit besser als die Netzwerkkamera, aber auch hier besteht das Problem, dass verschiedene chromatische Farbfelder auf ähnliche invariante Werte abgebildet werden.

7.3 Qualitative Bewertung mit den Campusbildserien

7.3.1 Verfahren nach Finlayson et al.

Unter Verwendung des kalibrierten Winkels von 30° wurden die invarianten Darstellungen der 70 gewählten Campusbilder berechnet. Obwohl die Kalibrierung der Netzwerkkamera zeigt, dass die Kamera theoretisch für das Verfahren geeignet ist, ergeben sich ähnliche

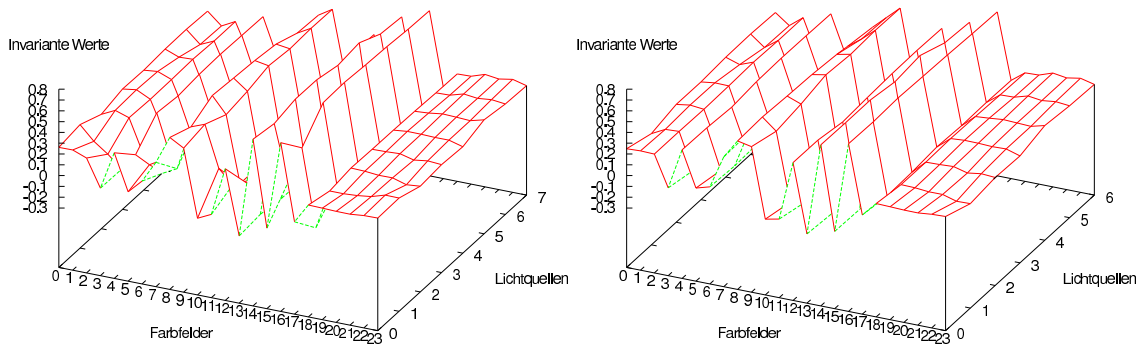


Abbildung 7.6: Invariante Werte der Farbfelder unter verschiedenen Beleuchtungen. Links: Kalibrierung 2 der Firewire Kamera. Rechts: Kalibrierung 3. Die Nummerierung der Lichtquellen entspricht der Reihenfolge der Lichtquellen in Tabelle 7.2.

Schwierigkeiten wie bei der Berechnung der invarianten Darstellung durch Entropieminimierung. Abbildung 7.7 veranschaulicht die Problematik. Bei einigen invarianten Bildern, wie im ersten Beispiel, ist die Schattenkante noch stark sichtbar. Außerdem werden besonders im Bereich des Schattens die JPEG-Artefakte verstärkt. Im zweiten Beispiel nimmt der Schatten einen großen Teil des Bildes ein, sodass die Strukturen in der Szene von den starken Artefakten überlagert werden. Das dritte Beispiel zeigt, dass in der invarianten Darstellung auch Materialkanten verloren gehen, da benachbarte Flächen auf ähnliche invariante Werte abgebildet werden. Bei dieser Szene ist dieses Ergebnis absehbar, da fast nur achromatische Flächen vorhanden sind. Die Campusbilder sind generell wenig geeignet für das Verfahren nach Finlayson, da die Szenen oft benachbarte achromatische Flächen enthalten. Das Hauptproblem sind aber die starken JPEG-Artefakte. Essentieller Bestandteil der Schattendetektion nach Finlayson ist die Kantendetektion auf dem invarianten Bild. Durch die Artefakte führt diese aber zu keinen brauchbaren Ergebnissen. Die Schattenkantendetektion und somit Schattenentfernung nach Finlayson ist bei den Campusbildsequenzen daher nicht möglich. Die Artefakte sind wohl auch die Ursache dafür, dass die Winkel, die bei dem Verfahren zur Entropieminimierung berechnet wurden, stark voneinander und vom kalibrierten Winkel abweichen.



Abbildung 7.7: Drei Farbbilder der Netzwerkkamera und rechts daneben jeweils das zugehörige invariante Grauwertbild.

7.3.2 Verfahren von Weiss

Obwohl die gewählten Bildsequenzen die Annahme einer statischen Szene nicht erfüllen, ergeben sich insgesamt recht gute Ergebnisse. Abbildung 7.8 zeigt beispielhafte Ergebnisse. Die zugehörigen Eingabesequenzen sind im Anhang in Abbildung C.1 dargestellt. Links in Abbildung 7.8 ist ein gutes Ergebnis für eine nicht registrierte Sequenz zu sehen. Durch die Medianfilterung stören Objekte, die nur in einzelnen Bildern der Sequenz vorhanden sind, das Verfahren nicht. Der prägnante Schlagschatten wurde gut entfernt. Der Schatten des Baumstamms ist aber weiterhin sichtbar, da sich dessen Position über die Sequenz nicht ändert. Das zweite Bild in Abbildung 7.8 zeigt ein Beispiel für ein Ergebnis, das sich bei Eingabe einer registrierten Sequenz erreichen lässt. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der nicht registrierten Sequenzen sind die Kanten scharf. Nur die Büsche im Vordergrund wirken teilweise verschwommen, da sich diese kontinuierlich über die Sequenz bewegen. Abbildung 7.8 veranschaulicht in den drei Bildern rechts Schwierigkeiten, die sich bei der Anwendung des Verfahrens von Weiss ergeben. Die Campusszenen sind sehr belebt. Vereinzelt bewegte Objekte stören das Verfahren zwar nicht, aber bei einigen Sequenzen wechselt der Bildinhalt an einer bestimmten Stelle kontinuierlich. Im Ergebnis sind dann schemenhafte Strukturen, wie im dritten Bild in Abbildung 7.8 erkennbar. Das zweite Beispiel rechts zeigt, dass in manchen Fällen Falschfarben entstehen, was auf die getrennte Behandlung der Kanäle und die nicht registrierten Bilder zurückzuführen ist. Die Hauswand im Bild rechts sieht unnatürlich flach aus. Dies liegt daran, dass je nach Beleuchtungsschwankung durch das Verfahren von Weiss auch Shading Effekte eliminiert werden.



Abbildung 7.8: Beispielergebnisse der Schattenentfernung mit dem Verfahren von Weiss. Die Eingabesequenzen sind in Anhang C.1 abgebildet.

Mit dem Verfahren von Weiss lassen sich gute Ergebnisse auf den Campussequenzen erzielen, wenn die folgenden Voraussetzungen erfüllt sind: Die Bildsequenzen müssen vorher registriert werden. Damit Schatten entfernt werden können, müssen die Beleuchtungsverhältnisse von Bild zu Bild ausreichend wechseln. Außerdem dürfen über die Sequenz keine kontinuierlichen Schwankungen des Szeneninhalts an derselben Bildposition auftreten. Solche Sequenzen auf Basis der vorliegenden Campussequenzen zu erstellen, gestaltet sich teilweise schwierig. Der Campus ist sehr belebt und die Bewegungen auf dem Campus hängen meist sogar von den wechselnden Beleuchtungsverhältnissen ab. Das heißt, wenn ausreichend Beleuchtungswechsel vorliegt, ist meist auch viel Bewegung in der Szene.

Nach der folgenden Untersuchung des Verfahrens anhand von Laborexperimenten, werden in Abschnitt 7.5 die Vor- und Nachteile des Verfahrens zusammengefasst.

7.4 Quantitative Bewertung mit Laboraufnahmen

7.4.1 Erzeugung von Ausgangs- und Ground-Truth Daten

Zur quantitativen Bewertung der Verfahren wurden die benötigten Ausgangsdaten im Labor erzeugt. Diese umfassen die Eingabebilder für die zu vergleichenden Verfahren, sowie Bilder anhand derer die benötigten Ground-Truth Daten erzeugt werden können. Folgende Ground-Truth Daten werden benötigt: Die Aufnahme f_{gt} der Szene ohne Schatten, das binäre Schattenkantenbild S_e und das binäre Schattenregionenbild S_r . Der Laboraufbau wurde so konzipiert, dass keine manuelle Segmentierung der Schattenregionen erforderlich ist.

Laboraufbau und Erzeugung der Ausgangsdaten Der im Folgenden beschriebene Laboraufbau wird durch Abbildungen in Anhang D veranschaulicht. Zur Aufnahme der Ausgangsbilder wurde die kalibrierte Firewire Kamera mit den in Tabelle B.2 aufgelisteten Einstellungen verwendet. Als Szene, in die ein Schatten geworfen wird, dient der Macbeth ColorChecker[®], der auf homogenem, mattem Tonpapier liegt. Der ColorChecker[®] wurde verwendet, da dieser matte, verschieden farbige Flächen enthält. Außerdem liefert das schwarze Gitter klare Strukturen, mögliche Artefakte bei der Schattenentfernung sind daher gut erkennbar. Die Szene wird indirekt durch einen 400 Watt Halogenstrahler und direkt durch eine 100 Watt Glühbirne beleuchtet. Der Schatten wird durch eine Holzleiste (im Folgenden: Schattenobjekt) verursacht, die an einem Stativ befestigt ist. Die Holzleiste selbst befindet sich immer außerhalb der durch die Kamera sichtbaren Szene.

Mit dem Laboraufbau wurden Bildsequenzen einer jeweils statischen Szene mit bewegtem Schatten und die Bilder zur Berechnung der zugehörigen Ground-Truth Daten aufgenommen. Eine Sequenz wurde wie folgt erzeugt:

1. Beide Lichtquellen werden fest positioniert.
2. Im sichtbaren Bereich der Kamera wird die Position des ColorChecker[®] gewählt.
3. Das Schattenobjekt wird so positioniert, dass die Szene keinen Schatten zeigt. Die Aufnahme dieser Szene ohne Schatten (Abb. 7.9 a)) liefert die Ground-Truth Aufnahme f_{gt} .
4. Der ColorChecker[®] wird mit einem homogenen matten Tonkarton abgedeckt. Von dieser Szene wird eine Aufnahme f_h (Abb. 7.9 b)) erstellt.
5. Das Schattenobjekt wird so positioniert, dass der Schatten im Kamerabild sichtbar ist. Von dieser Szene wird eine Aufnahme f_{hs} (Abb. 7.9 c)) erstellt.
6. Die homogene Abdeckung wird entfernt. Das Bild f des ColorChecker[®] mit Schatten (Abb. 7.9 d)) ist Teil der Bildsequenz.
7. Wenn die gewünschte Länge der Sequenz erreicht ist, wird der Prozess beendet. Andernfalls wird der ColorChecker[®] mit dem homogenen Tonkarton abgedeckt und mit Punkt 5 fortgefahren.

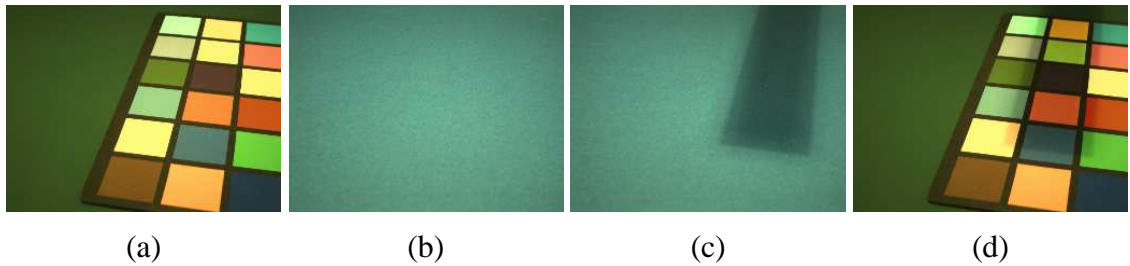


Abbildung 7.9: a) Ground-Truth Szene, b) Homogene Szene, c) Homogene Szene mit Schatten, d) Szene mit Schatten.

Mit diesem Vorgehen wurden zwei Sequenzen, eine mit 8 Einzelbildern und eine mit 5 Einzelbildern erzeugt. Diese sind im Anhang in Abbildung C.2 und C.3 dargestellt. Für die Analyse der in der Arbeit umgesetzten Schattendetektion und Schattenentfernung, sowie der Schattenentfernung mit Hilfe der Reintegration von Weiss stehen somit 13 Eingabebilder zur Verfügung. Für die Analyse der Schattenentfernung auf Bildsequenzen nach Weiss wurden die 2 Sequenzen in insgesamt 7 Sequenzen unterteilt. Aus welchen Einzelbildern sich diese zusammensetzen, ist in Tabelle C.1 aufgelistet.

Erzeugung der Ground-Truth Schattenbilder Zu jeder Schattenposition werden die Ground-Truth Schattenbilder S_e und S_r (Abb. 7.10 a), b)) berechnet. Das Struktogramm in Abbildung 7.11 beschreibt den Algorithmus. Gegeben sind das Bild f_h mit homogenem Grund und das Bild f_{hs} mit Schatten auf homogenem Grund. Nach einer kantenerhaltenden Filterung des Bilds mit Schatten wird eine Kantendetektion mit dem Canny-Operator durchgeführt. Eine Dilatation, gefolgt von einer Schließung, liefert das Schattenkantenbild S_e . Dabei wird ein Strukturelement der Fenstergröße 7×7 verwendet. Die Binarisierung der Differenz $f_h - f_{hs}$, Veroderung mit S_e und anschließende Schließung liefert ein Binärbild S_s , das alle Schattenpixel repräsentiert. Die Exklusiv-Veroderung von S_s und S_e liefert das Schattenregionenbild S_r , das die Schattenpixel innerhalb der Schattengrenzen angibt. Die bei den Experimenten verwendete Parameterkonfiguration ist im Anhang in Tabelle B.4 aufgelistet.

Aus den Ground-Truth Schattenbildern, die zu einer Sequenz gehören, werden, wie in Gleichung 6.13 und 6.14 beschrieben, die kombinierten Ground-Truth Schattenkantenbil-

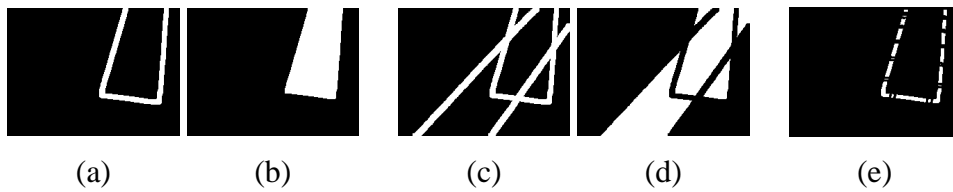


Abbildung 7.10: a) Ground-Truth Schattenkantenbild, b) Ground-Truth Schattenregionenbild, c) Kombiniertes Ground-Truth Schattenkantenbild, d) Kombiniertes Ground-Truth Schattenregionenbild, e) Ground-Truth Schattenkantenbild s_{gt} als Eingabe zur Schattenentfernung.

Eingabe: Bild von homogener Fläche f_h , Bild von homogener Fläche mit Schatten f_{hs} , Parameter: Binarisierungsschwellwert, Parameter für Bilateralen Filter und Canny-Operator
$f'_{hs} = \text{BilateralFilter}(f_{hs})$
$S_e = \text{Canny}(f'_{hs})$
Dilatation $S_e = S_e \oplus S_{7 \times 7}$
Schließung $S_e = ((S_e \oplus S_{7 \times 7}) \ominus S_{7 \times 7})$
$d = \text{Binarisierung der Differenz } f_h - f_{hs}$
$S_s = d \text{ OR } S_e$
Schließung $S_s = ((S_s \oplus S_{7 \times 7}) \ominus S_{7 \times 7})$
$S_r = S_s \text{ XOR } S_e$
Ausgabe: Ground-Truth Schattenbilder S_e, S_r

Abbildung 7.11: Struktogramm zur Ground-Truth Schattendetektion.

der S_{e_c} und S_{r_c} für die jeweilige Sequenz berechnet. In Abbildung 7.10 c) und d) sind die Ergebnisse für Laborsequenz 1.4 dargestellt.

In Abschnitt 6.2.4 wurde vorgeschlagen, ein Ground-Truth Schattenkantenbild s_{gt} zu verwenden, um die Schattenentfernung mit dem Retinex und die Schattenentfernung durch Reintegration nach Weiss zu vergleichen. Hierzu kann nicht das Schattenkantenbild S_e direkt verwendet werden, da dieses auch Schattenkantenpixel enthält, die mit Materialkantenpixeln zusammenfallen. Die Verwendung dieses Schattenkantenbilds würde an diesen Pixelpositionen Artefakte bei der Schattenentfernung verursachen. Das binäre Schat-

Eingabe: Farbbild f_{gt} , Ground-Truth Schattenkantenbild S_e , Parameter für Bilateralen Filter und Canny-Operator
$f'_{\text{gt}} = \text{BilateralFilter}(f_{\text{gt}})$
$c_{\text{gt}} = \text{Canny}(f'_{\text{gt}})$
Dilatation $c'_{\text{gt}} = c_{\text{gt}} \oplus S_{3 \times 3}$
Erosion $S'_e = S_e \ominus S_{3 \times 3}$
$s_{\text{gt}} = S'_e \text{ ANDNOT } c'_{\text{gt}}$
Ausgabe: Schattenkantenbild s_{gt}

Abbildung 7.12: Struktogramm zur Berechnung des Ground-Truth Schattenkantenbilds s_{gt} .

tenkantenbild s_{gt} (Abb. 7.10 e)) enthält nur die Schattenkantenpixel des Ground-Truth Schattenkantenbilds S_e , die keine Kanten im Ground-Truth Bild f_{gt} der Szene darstellen. Außerdem werden die Schattenkanten durch Dilatation ausgedünnt, damit die Schattenkante nicht in Bereiche von Materialkanten hineinragt. Die Erzeugung wird in Struktogramm 7.12 beschrieben. Die verwendeten Parameter sind im Anhang in Tabelle B.5 angegeben.

7.4.2 Versuchsdurchführung

Schattenentfernung mit dem Retinex Zu den 13 Eingabebildern wurden auf Basis von sieben verschiedenen Parameterkonfigurationen Ergebnisse der Schattenentfernung mit dem Retinex berechnet. In Anhang B.2, Tabelle B.3, sind für die Basiskonfiguration alle Parameter zur Schattenkantendetektion und Schattenentfernung und deren Belegung aufgelistet. In Tabelle 7.3 sind nur die Parameter angegeben, in denen sich die sieben Konfigurationen unterscheiden. Die Konfigurationen 1a bis 1d unterscheiden sich nur in der Anzahl der Pfade, die bei der Schattenentfernung mit dem Retinex pro Pixel verfolgt werden. Bei Konfiguration 2 wird bei der Detektion der Schattenkanten die Information des Hue-Kanals (s. Abschnitt 4.3) nicht berücksichtigt. In Konfiguration 3 ist die Rekursionstiefe zur Erzeugung der Brown'schen Pfade Null, das heißt es werden gerade Pfade

Konfiguration	Unterschiede in der Konfiguration
1a	Retinex-Pfadanzahl $pn = 5$
1b	Retinex-Pfadanzahl $pn = 10$
1c	Retinex-Pfadanzahl $pn = 20$
1d	Retinex-Pfadanzahl $pn = 50$
2	wie 1c, aber Flag $hue = false$
3	wie 1c, aber Rekursionstiefe $rd = 0$
4	wie 1c, aber Verwendung des Schattenkantenbilds s_{gt}

Tabelle 7.3: Unterschiede in den Konfigurationen des Algorithmus zur Schattenkantendetektion und Schattenentfernung mit dem Retinex.

erzeugt. Bei Konfiguration 4 wird keine Schattenkantendetektion durchgeführt, sondern es wird das Ground-Truth Schattenkantenbild s_{gt} verwendet.

Die verschiedenen Konfigurationen wurden gewählt, um den Einfluss der jeweiligen Parameter auf das Ergebnis der Schattenentfernung zu untersuchen. Außerdem soll anhand der Ergebnisse geprüft werden, ob die Bewertung durch die definierten technischen Bewertungsmaße einen Vergleich der Ergebnisse ermöglicht, der mit dem subjektiven Eindruck übereinstimmt.

Schattenentfernung mit dem Verfahren von Weiss Für die Laborexperimente wurde die Implementierung von Weiss so angepasst, dass am Ende keine Skalierung der Pixelwerte stattfindet. Zur Darstellung der in Abschnitt 6.2.2 erläuterten Problematik skalierteter Pixelwerte werden in der folgenden Untersuchung aber auch Ergebnisse mit Skalierung vorgestellt. Für einen Vergleich der Schattenentfernung mit dem Retinex und des Verfahrens von Weiss wurden in Abschnitt 6.2.4 zwei Vorgehensweisen vorgeschlagen. Dazu wurde das Verfahren von Weiss auf die insgesamt sieben Sequenzen angewendet. Für einen direkten Vergleich mit der Schattenentfernung mit dem Retinex wurde außerdem auf den 13 Einzelbildern eine Schattenentfernung durch die Reintegration nach Weiss unter Verwendung des Ground-Truth Schattenkantenbilds s_{gt} durchgeführt.

	1a	1b	1c	1d	2	3	4
$\bar{\Delta}_e$	-7.25588	-8.21949	-8.92681	-9.21273	-1.27325	-5.87454	-23.17815
$\bar{\Delta}_i$	-1.00541	-1.38385	-1.62732	-1.81053	5.45229	-0.16063	-1.17186
$\bar{\Delta}_o$	6.07362	5.32652	4.53459	4.05527	26.96606	9.66645	1.65314

Tabelle 7.4: Mittlere prozentuale Abweichung der Gradientenabstände für die 7 Konfigurationen der Schattenkantendetektion und der Schattenentfernung mit dem Retinex.

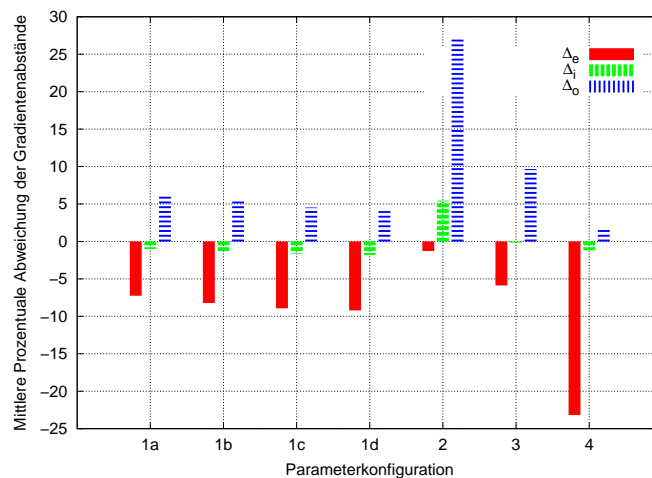


Abbildung 7.13: Veranschaulichung der Werte in Tabelle 7.4.

7.4.3 Ergebnisse

Schattenentfernung mit dem Retinex Für jedes der insgesamt 91 Ergebnisbilder \hat{f}_F der Schattenentfernung mit dem Retinex wurden die mittleren Gradientenabstände $d_e(f_{gt}, \hat{f}_F)$, $d_i(f_{gt}, \hat{f}_F)$ und $d_o(f_{gt}, \hat{f}_F)$ sowie die prozentuale Abweichung der Gradientenabstände $\Delta_e(f_{gt}, \hat{f}_F)$, $\Delta_i(f_{gt}, \hat{f}_F)$, $\Delta_o(f_{gt}, \hat{f}_F)$ berechnet. Für jede Konfiguration wurden diese gemittelt. Tabelle 7.4 listet für jede Konfiguration die mittlere prozentuale Abweichung der Gradientenabstände auf. Abbildung 7.13 veranschaulicht die Werte grafisch.

$\bar{\Delta}_{WF_e}$	-13.15768
$\bar{\Delta}_{WF_i}$	-26.81338
$\bar{\Delta}_{WF_o}$	-14.98361

Tabelle 7.5: Mittlere prozentuale Abweichung der mittleren Gradientenabstände der Ergebnisse von Weiss von den mittleren Gradientenabständen des für die Sequenz besten Ergebnisses von Konfiguration 1c.

Vergleich mit dem Verfahren von Weiss

1) Die sieben Ergebnisbilder, die sich durch Anwendung des Verfahrens von Weiss auf die sieben Laborsequenzen ergeben, sollen jeweils mit dem besten Ergebnis verglichen werden, das sich durch die Schattenentfernung mit dem Retinex für die Bilder der jeweiligen Sequenz ergibt. Exemplarisch wird hier ein Vergleich mit den Ergebnissen der Konfiguration 1c vorgenommen. Das beste Ergebnis wurde anhand des gesamten mittleren Gradientenabstands ausgewählt. Für jedes der sieben zu vergleichenden Ergebnisbildpaare, \hat{f}_{F_m} und \hat{f}_W wurde die prozentuale Abweichung der Gradientenabstände $\Delta_{WF_e}(\hat{f}_{F_m}, \hat{f}_W)$, $\Delta_{WF_i}(\hat{f}_{F_m}, \hat{f}_W)$, $\Delta_{WF_o}(\hat{f}_{F_m}, \hat{f}_W)$ berechnet (s. Gleichung 6.18 bis 6.20). Tabelle 7.5 zeigt die über die sieben Ergebnisse gemittelte prozentuale Abweichung der Gradientenabstände. Die Werte zeigen um wieviel Prozent die Gradientenabstände des Ergebnisses von Weiss im Mittel von den Gradientenabständen des Ergebnisses der Schattenentfernung mit dem Retinex abweichen.

2) Die 13 Ergebnisse der Schattenentfernung durch die Reintegration nach Weiss werden mit den Ergebnissen der Konfiguration 4 verglichen. Dazu wurden zu den Ergebnissen von Weiss die prozentualen Abweichungen der Gradientenabstände $\Delta_e(f_{gt}, \hat{f}_W)$, $\Delta_i(f_{gt}, \hat{f}_W)$, $\Delta_o(f_{gt}, \hat{f}_W)$ berechnet und gemittelt. Ebenso wurde für die Ergebnisbilder verfahren, die sich aus der Reintegration nach Weiss mit abschließender Skalierung ergeben. Tabelle 7.6 vergleicht die mittlere prozentuale Abweichung der Gradientenabstände, Abbildung 7.14 veranschaulicht die Werte.

Hier wurden zur Übersichtlichkeit nur die gemittelten Ergebnisse vorgestellt. Auf der beiliegenden CD (siehe Anhang F) sind alle Evaluationsergebnisse, die zu den gemittelten Werten führen, zu finden.

	Retinex Konfiguration 4	Weiss-Reintegration	Weiss-Reintegration mit Skalierung
$\bar{\Delta}_e$	-23.17815	-20.61934	-17.68121
$\bar{\Delta}_i$	-1.17186	0.45153	-0.41917
$\bar{\Delta}_o$	1.65314	0.55125	23.42259

Tabelle 7.6: Mittlere prozentuale Abweichung der Gradientenabstände für die Schattenentfernung mit dem Retinex bei Konfiguration 4 und die Schattenentfernung durch Reintegration nach Weiss, ohne und mit Skalierung der Pixelwerte.

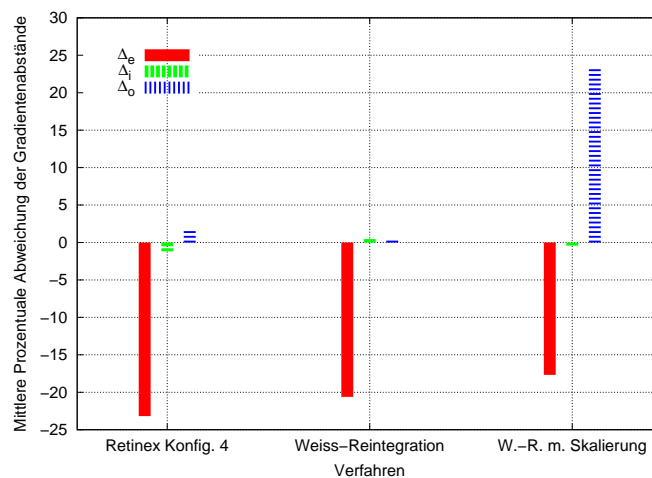


Abbildung 7.14: Veranschaulichung der Werte in Tabelle 7.6.

Laufzeiten Tabelle 7.7 listet die Laufzeiten verschiedener Algorithmen in Sekunden auf. Der Algorithmus von Weiss, sowie dessen Modifikationen, liegen als MATLAB-Code vor. Die in der Arbeit vorgestellten Algorithmen wurden in C++ implementiert.¹ Die Laufzeiten sind daher zwar nicht direkt vergleichbar, ermöglichen aufgrund der großen Unterschiede aber einen Vergleich des Rechenaufwands. Für jeden Prozess sind die Eingabedaten und die grundlegende Parameterkonfiguration (s. Basiskonfiguration in Tabelle B.3 und weitere in Tabelle 7.3) angegeben. Die Eingabebilder besitzen jeweils eine Auflösung

¹In Anhang E werden die implementierten Klassen und Programme aufgelistet.

Prozess	Eingabedaten	Laufzeit	Beschreibung
Entropieminimierung	Farbbild mit Schatten	7,9	Struktogramm Abb. 4.3
Schattendetektion	Farbbild mit Schatten Basiskonfiguration	0,9	Struktogramm Abb. 4.7
Retinex Schattenentfernung	Farbbild mit Schatten, Schattenkantenbild		Struktogramm Abb. 5.5
	Konfiguration 1a	30,0	
	Konfiguration 1b	60,0	
	Konfiguration 1c	127,0	
	Konfiguration 1d	335,0	
Schattenentfernung durch Reintegration nach Weiss	Farbbild mit Schatten, Schattenkantenbild	1,0	s. Abschnitt 6.2.4
Schattenentfernung nach Weiss	Sequenz aus 3 Farbbildern mit Schatten	2,0	s. Abschnitt 3.2

Tabelle 7.7: Laufzeiten der Algorithmen in Sekunden.

von 256 x 192 Pixeln. In der letzten Spalte ist der Verweis auf das Kapitel oder das Struktogramm angegeben, welches den Algorithmus beschreibt.

7.4.4 Validierung und Verifikation

Schattenentfernung mit dem Retinex Die Ergebnisse der quantitativen Bewertung der Konfigurationen 1a bis 1d stimmen mit den theoretisch erwarteten Ergebnissen und der subjektiven Bewertung überein: Je mehr Pfade bei der Schattenentfernung mit dem Retinex verwendet werden, umso besser wird der Schatten entfernt. Der mittlere Gradientenabstand im Bereich der Schattenkante, sowie im Schatten wird verringert. Außerdem werden Artefakte reduziert. Der mittlere Gradientenabstand außerhalb des Schattens wird verringert. Abbildung 7.15 veranschaulicht die Auswirkung der zunehmenden Pfadanzahl anhand der Ergebnisse zu Laborszene 1.8 (Basissequenz 1, Bild 8, s. Anhang C.2) und Laborszene 2.2. Im Druck sind die Unterschiede nicht gut erkennbar. In der zweiten Zeile

sind daher jeweils die Kantenbilder der Ergebnisse dargestellt, um die fehlerhaften Strukturen zu verdeutlichen. Zwischen 5 und 20 Pfaden ist die Verbesserung des Ergebnisses noch erkennbar, zwischen 20 und 50 Pfaden ist aber kein Unterschied mehr feststellbar.

Die Beispiele zeigen auch, dass die Verbesserung der Schattenentfernung optisch kaum zu erkennen ist. Artefakte treten auch im Bereich von Schattenkanten auf, wie in Abbildung 7.15 oben. Der Gradientenabstand im Bereich der Schattenkante wird dadurch beeinflusst, was die relativ deutliche Abnahme der prozentualen Abweichung des Gradientenabstands im Bereich der Schattenkante erklärt.

In der Grafik in Abbildung 7.13 fällt auf, dass die negative prozentuale Abweichung des Gradientenabstands innerhalb des Schattens, $\bar{\Delta}_i$, im Vergleich zu dem im Bereich der Schattenkante, $\bar{\Delta}_e$, immer sehr gering ist, auch bei Konfiguration 4 (Verwendung des Ground-Truth Schattenkantenbilds). Demnach wird der Schatten, auch bei vollständigem Schattenkantenbild, innerhalb der Schattengrenzen nicht gut entfernt. Dies stimmt mit dem subjektiven Eindruck überein. Abbildung 7.16 zeigt die Ergebnisse der Konfiguration 4 für Laborszene 1.8 und 2.2. Die Schattenkante wird zwar abgeschwächt, aber der Kernschatten ist noch erkennbar. Eine Ursache dafür ist, dass der Schatten einen breiten Halbschattenbereich besitzt, wie z. B. in Abbildung 7.9 c) zu erkennen ist. An der Schattenkante, beim Übergang in den Halbschatten, wird der Wert entlang eines Retinex-Pfades übernommen. Danach werden die Bildwerte bis in den Kernschatten kontinuierlich dunkler, entlang des Pfades findet aber keine Korrektur mehr statt. Gut entfernt werden kann ein Schatten mit dem Retinex-Verfahren nur dann, wenn der Übergang in den Kernschatten vom Bereich der detektierten Schattenkante abgedeckt wird. Eine weitere Ursache wird in Abbildung 7.16 b) deutlich: Schatten am Rand oder Eckbereich des Bildes werden schlecht entfernt, da hier zur Mittelung eines Pixelwerts viele Pfade beitragen, die im Schatten starten, die Schattenkante nicht kreuzen und somit keine Korrektur des Pixelwerts herbeiführen.

Der Vergleich der $\bar{\Delta}_e$ -Werte von Konfiguration 1c mit Konfiguration 4 in Abbildung 7.13 zeigt, dass die Schattenkante viel besser abgeschwächt wird, wenn, bei sonst gleicher Konfiguration, die Ground-Truth Schattenkante s_{gt} verwendet wird. Oder umgekehrt, zeigt der Unterschied, dass die Schattenkanten nicht vollständig detektiert werden. Abbildung 7.17 zeigt die mit der Basiskonfiguration berechneten Schattenkantenbilder von Szene 1.8 und

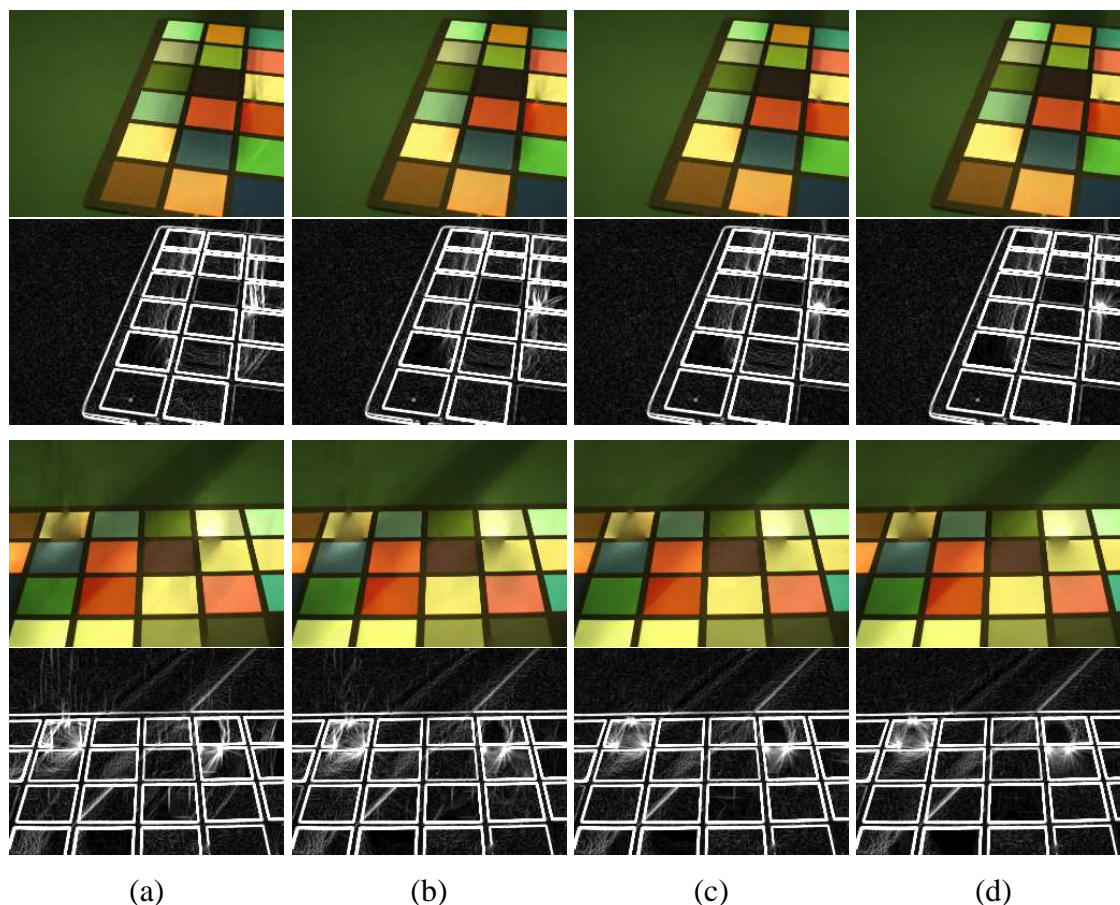


Abbildung 7.15: Ergebnisse der Retinex-Schattenentfernung, oben: Szene 1.8, unten: Szene 2.2. Von links nach rechts: a) Konfig. 1a, b) Konfig. 1b, c) Konfig. 1c, d) Konfig. 1d. In der 2. Zeile ist jeweils die Kantendetektion der Ergebnisse dargestellt, zur Verdeutlichung der Artefakte.

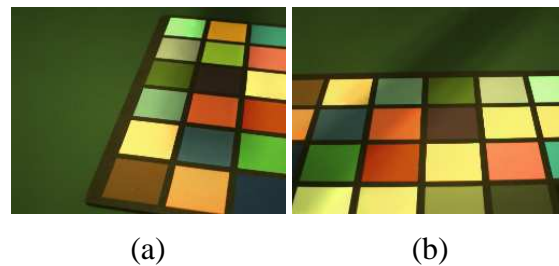


Abbildung 7.16: Ergebnisse der Retinex-Schattenentfernung bei Konfiguration 4. a) Szene 1.8, b) Szene 2.2.

Szene 2.2. Einige Schattenkantenpixel fehlen. In diesen Bereichen kann die Schattenkante nicht abgeschwächt werden (s. Abb. 7.15). Außerdem sind falsch klassifizierte Schattenkantenpixel vorhanden. Dies führt zur Erzeugung von Artefakten und somit zu einem Anstieg der Gradientenabstände außerhalb des Schattens (s. Abb. 7.13). Bei Konfiguration 4 ist die positive prozentuale Abweichung des mittleren Gradientenabstands außerhalb des Schattens am geringsten, da keine Artefakte erzeugt werden. Dass trotz korrekter Schattenkanteninformation eine geringe Abweichung vorliegt, ist darauf zurückzuführen, dass Pfade auch im Schatten starten können, sodass beim Austritt aus dem Schatten Fehler entstehen. Allgemein lässt sich feststellen, dass die Detektion der Schattenkanten eine Schwachstelle des Verfahrens zur Schattenentfernung darstellt. Fehlende Schattenkanteninformation ist im Ergebnis auffällig, da die scharfe Schattenkante nicht entfernt wird. Falsch klassifizierte Schattenkantenpixel sind problematisch, weil die Artefakte stark auffallen. In nur einem der 13 Ergebnisse werden keine sichtbaren Artefakte erzeugt. Teilweise sind die Artefakte zwar sehr schwach, aber Photoqualität wird bei den Testbildern im Allgemeinen nicht erreicht.

Der Vergleich der $\bar{\Delta}_o$ -Werte von Konfiguration 1c mit Konfiguration 2 zeigt, dass ohne Einbeziehung der Hue-Kanal Information die Erzeugung von Artefakten erheblich höher ist (vgl. Abbildung 7.18 a)). Die Artefakte sind auf die vermehrte Fehlklassifikation von Schattenkantenpixeln zurückzuführen. Abbildung 4.6 c) zeigt z. B. das mit Konfiguration 2 berechnete Schattenkantenbild von Szene 1.8. Die bei Konfiguration 2 positive Abweichung im Bereich innerhalb des Schattens deutet darauf hin, dass das Maß keine Aussage mehr über die Entfernung des Schattens liefern kann, da Artefakte innerhalb des Schattens



Abbildung 7.17: Ergebnisse der Schattenkantendetektion zu Szene 1.8 und 2.2 bei Verwendung der Basiskonfiguration.



Abbildung 7.18: Ergebnisse der Retinex-Schattenentfernung zu Szene 1.8. a) Konfiguration 2, b) Konfiguration 3.

den Wert beeinflussen. Zum Beispiel bei dem Ergebnis in Abbildung 7.18 a) beträgt die prozentuale Abweichung im Bereich der Schattenkante 7,87737, im Schatten 3,13920 und außerhalb 30,66284. Über die Güte der Schattenentfernung kann hier aufgrund der starken Artefakte auch subjektiv keine Aussage mehr getroffen werden.

Konfiguration 3 wurde ausgewertet, um zu zeigen, dass die Struktur der Brown'schen Retinex-Pfade Auswirkung auf das Ergebnis der Schattenentfernung hat. Wenn gerade Pfade beim Retinex verwendet werden, entstehen auffälliger Artefakte, wie z. B. Abbildung 7.18 b) zeigt. Im Vergleich zu Konfiguration 1c nimmt dementsprechend der Gradientenabstand außerhalb des Schattens deutlich zu. Bei den 13 Ergebnissen lässt sich keine Auswirkung auf die eigentliche Schattenentfernung feststellen. Da die Fehler aber weiter entlang des Pfades propagiert werden, reichen die Artefakte auch in den Bereich der Schattenkante und in den Bereich des Schattens hinein. Die beiden Maße Δ_e und Δ_i werden daher beeinflusst.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass anhand der Bewertungsmaße ein Vergleich verschiedener Ergebnisse möglich ist, der dem subjektiven Urteil entspricht. Die Problematik, dass die Maße im Bereich der Schattenkante und im Schatten keine eindeutige Aussage über die Güte der Schattenentfernung liefern können, wurde mehrfach dargestellt. Eine sehr hohe positive Abweichung des mittleren Gradientenabstands außerhalb des Schattens und positive Abweichungen im Bereich der Schattenkante oder im Schatten können aber darauf hinweisen, dass die Werte aufgrund der starken Artefakte nicht aussagefähig sind. Um wirklich nur die Schattenentfernung zu bewerten, sollte die Ground-Truth Schattenkante (Konfiguration 4) verwendet werden.

Vergleich mit dem Verfahren von Weiss

1) Laut den Werten in Tabelle 7.5 sind bei den Ergebnissen des Verfahrens von Weiss die mittleren Gradientenabstände im Bereich der Schattenkante im Mittel etwa 13%, innerhalb des Schattens etwa 27% und außerhalb des Schattens etwa 15% geringer als bei dem für die jeweilige Sequenz besten Ergebnis der Retinex-Schattenentfernung mit Konfiguration 1c. Dieses Ergebnis entspricht dem subjektiven Eindruck, dass die Schattenkante besser entfernt wird, und dass besonders auch der Kernschatten durch das Verfahren von Weiss gut entfernt werden kann. Außerdem werden keine Artefakte erzeugt. Die zwei ersten Bilder links in Abbildung 7.19 veranschaulichen diesen Vergleich. In Bild a) ist das Ergebnis der Schattenentfernung mit dem Retinex, in Bild b) das Vergleichsergebnis der Schattenentfernung von Weiss dargestellt. Wie gut der Schatten durch das Verfahren von Weiss entfernt wird, hängt stark von der Eingabesequenz ab. Abbildung 7.19 d) zeigt ein Ergebnis, bei dem der Schatten nur abgeschwächt werden konnte, weil die Eingabesequenz 1.4 nur aus zwei Bildern besteht. Links daneben zeigt Bild c) das Vergleichsergebnis der Retinex-Schattenentfernung. Im Bereich der Schattenkante ergibt sich die prozentuale Abweichung $\bar{\Delta}_{WF_e} = -10.04889$. Demnach wurde der Schatten im Ergebnis von Weiss besser entfernt. Dies entspricht nicht dem subjektiven Eindruck. Die Schattenkante ist teilweise schärfer erkennbar, als im Retinex-Ergebnis. In diesem befindet sich aber ein Artefakt im Bereich der Schattenkante. Auch hier stört der Einfluss von Artefakten auf den mittleren Gradientenabstand im Bereich der Schattenkante den Vergleich.

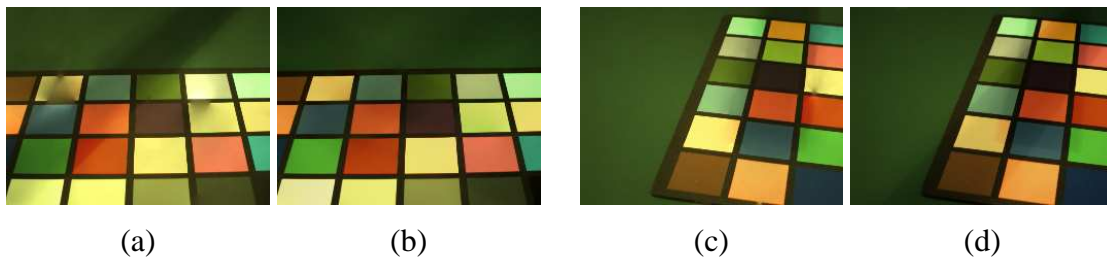


Abbildung 7.19: a) Retinex-Schattenentfernung zu Szene 2.2 bei Konfig. 1c, b) Schattenentfernung durch Weiss bei Eingabesequenz 2.2, c) Retinex-Schattenentfernung zu Szene 1.8 bei Konfig. 1c, d) Schattenentfernung durch Weiss bei Eingabesequenz 1.4.

Beim Vergleich der Verfahren sollten auch die großen Unterschiede in der erforderlichen Laufzeit betrachtet werden (s. Tabelle 7.7). Für eine ausreichende Abschwächung möglicher Artefakte sollten für die Laborsequenzen beim Retinex 20 Pfade verwendet werden. Die Laufzeit für die Schattenentfernung beträgt dann etwa 127 Sekunden. Die Schattendetektion erfordert weitere 0,9 Sekunden. Im Rahmen der Arbeit wurde keine Code-Optimierung durchgeführt. Es ist daher anzunehmen, dass geringere Laufzeiten möglich sind, aber sicher keine, die mit denen des Verfahrens von Weiss vergleichbar sind. Für die Verarbeitung einer Eingabesequenz von 3 Farbbildern wurden nur 2 Sekunden gemessen.

2) Beim subjektiven Vergleich der 13 Ergebnisbilder der Retinex-Schattenentfernung bei Konfiguration 4 und der Schattenentfernung durch Reintegration nach Weiss (ohne Skalierung) sind kaum Unterschiede feststellbar. Die Abschwächung der Schattenkante betreffend ergeben sich bei Weiss teilweise etwas schlechtere Ergebnisse. Der Vergleich der Werte in Tabelle 7.6 bzw. Abbildung 7.14 entspricht diesem Eindruck. Abbildung 7.20 zeigt in Bild a) exemplarisch ein Ergebnis der Retinex-Schattenentfernung und in Bild b) der Reintegration nach Weiss. Beide Ergebnisse basieren auf denselben Eingabedaten, Laborszene 1.2 und das zugehörige Ground-Truth Schattenkantenbild s_{gt} . In Bild b) ist die Schattenkante etwas stärker sichtbar. Diese Tatsache ist wohl darauf zurückzuführen, dass bei der Retinex-Schattenentfernung für zwei entlang des Pfades aufeinander folgende Pixelpositionen überprüft wird, ob eine Schattenkante vorliegt (s. Struktogramm in Abb. 5.5). Somit wird ein größerer Bereich über die Schattenkante berücksichtigt. Der Kernschatten wird auch bei der Reintegration nach Weiss nicht ausreichend entfernt. Da

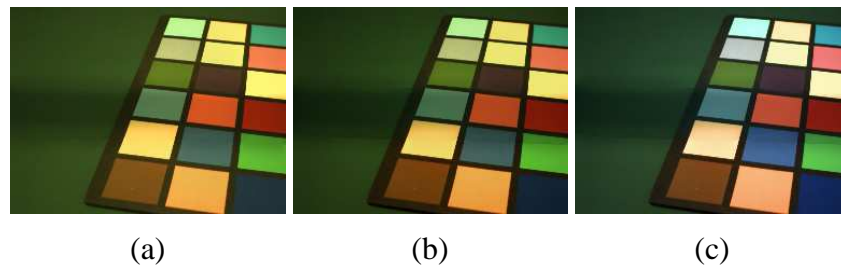


Abbildung 7.20: Ergebnisse zu Szene 1.2. a) Retinex-Schattenentfernung bei Konfiguration 4, b) Schattenentfernung durch Reintegration nach Weiss ohne Skalierung, c) mit Skalierung.

dieses Verfahren auf demselben Prinzip basiert, im Bereich der Schattenkante die Gradienten Null zu setzen, hat der Breite Halbschattenbereich die gleiche Auswirkung wie beim Retinex-Verfahren. Die Ergebnisse beider Verfahren sind ähnlich, aber bei der Reintegration nach Weiss besteht, die Laufzeit betreffend, ein erheblicher Vorteil.

Tabelle 7.6 bzw. Abbildung 7.14 präsentiert auch die Bewertung der Weiss-Reintegration mit Skalierung, um den (verfälschenden) Einfluss der Skalierung auf die Bewertungsmaße zu demonstrieren. Dieser ist besonders am Wert $\bar{\Delta}_o$ erkennbar. Die hohe Abweichung von etwa +23% vermittelt den Eindruck, dass starke Artefakte entstehen, ist aber auf die Skalierung der Pixelwerte zurückzuführen. In Abbildung 7.20 c) ist ein Beispielergebnis dargestellt. Die Qualität der Schattenentfernung entspricht der ohne Skalierung, aber im Vergleich zur Ground-Truth Szene ohne Schatten (Abb. 7.9 a)) ist eine Farbabweichung erkennbar. Falls der Aspekt der Farbtreue ein wichtiges Kriterium für ein gutes Ergebnis darstellt, kann der Einfluss auf die Maße auch gewünscht sein.

Abschließend lässt sich feststellen, dass anhand der Bewertungsmaße auch ein Vergleich zwischen den verschiedenen Verfahren zur Schattenentfernung möglich ist. Es wurde gezeigt, dass die Ergebniswerte die wesentlichen Unterschiede und Ähnlichkeiten in den Ergebnissen widerspiegeln. Bei der ersten Variante zum Vergleich der Verfahren wurde aber wieder deutlich, dass Artefakte im Schattenkantenbereich die vergleichende Bewertung einzelner Ergebnisse verfälschen. In Abschnitt 6.2.1 wurde der Erhalt von Strukturen im Schattenkantenbereich als Anforderung an Verfahren zur Schattenentfernung genannt.

Ein möglicher Strukturverlust ist bei den Laborbildern nicht bemerkbar, da die Szene aus homogenen Flächen aufgebaut ist. Daher konnte hier der Einfluss auf das Maß im Bereich der Schattenkante nicht untersucht werden.

7.5 Zusammenfassende Bewertung der Verfahren

Im Folgenden werden das Verfahren von Weiss [Wei01] und die nach Finlayson et al. [FHD02a, FHD02b] umgesetzten und modifizierten Verfahren zur Schattendetektion und Schattenentfernung abschließend verglichen und bewertet.

Das Verfahren von Weiss zur Entfernung von Schatten aus Bildsequenzen hat mehrere Vorteile: Es werden keine Anforderungen an die Beschaffenheit der einzelnen Schatten gestellt. Schatten können unabhängig von ihrem Kontrast zum Hintergrund und von der Komplexität der Schattenkontur entfernt werden. Die Gradienten des Ergebnisbildes ergeben sich aus dem Median der Eingabebildsequenzen. Im Gegensatz zu Verfahren, die, wie die Schattenentfernung mit dem Retinex, auf der Nullsetzung von Schattenkanten basieren, entsteht somit kein Strukturverlust im Bereich der Schattenkanten. Wenn die Szene statisch ist, können Materialkanten nicht fälschlicherweise als Schattenkanten "detektiert" werden. Es werden somit keine Artefakte erzeugt. Gegenüber der Schattenentfernung mit dem Retinex besteht außerdem ein großer Laufzeit-Vorteil. Von Nachteil ist, dass das Verfahren nur auf Bildsequenzen arbeitet, und dass diese bestimmte Anforderungen erfüllen müssen. Schatten können nur entfernt werden, wenn sich diese über die Sequenz ausreichend bewegen. Außerdem muss der Hintergrund statisch sein, da sonst Artefakte erzeugt werden. Vereinzelt bewegte Objekte stören das Verfahren aber nicht. Des Weiteren verursacht das Reintegrationsverfahren eine Verfälschung der Farben durch eine multiplikative oder additive Abweichung. Je nach Anwendung kann dann eine zusätzliche Korrektur der Beleuchtung [FHD02a] erforderlich sein.

Bei der eigenen Umsetzung der Retinex-Schattenentfernung ist keine Farbkorrektur nötig, da die Farbwerte außerhalb des Schattens weitestgehend erhalten bleiben. Ein Vorteil des nach Finlayson et al. umgesetzten Verfahrens zur Schattenkantendetektion ist, dass dieses auf Einzelbildern arbeitet. Allerdings werden einschränkende Anforderungen an die

dargestellte Szene gestellt. Es müssen ausreichend scharfe und einfache Schattenkonturen vorliegen, es können also nur Schlagschatten detektiert werden. Außerdem müssen die Lichtquellen in der Szene als Planck'sche Strahler approximiert werden können. Das Verfahren kann nur eingesetzt werden, wenn die Kamera das Bildentstehungsmodell ausreichend erfüllt und die Bildqualität hoch ist. Zudem ist eine Art Kamerakalibrierung erforderlich. Es besteht zwar die Alternative der Entropieminimierung, aber diese erfordert bei jeder Schattenentfernung weitere Rechenzeiten. Abweichungen von den strengen Annahmen führen zu Fehlern bei der Schattenkantenkantendetektion: Das Schattenkantenbild weist meist Lücken auf, sodass der Schatten nicht vollständig entfernt werden kann. Außerdem sind falsch klassifizierte Pixel enthalten, die zu Artefakten bei der Schattenentfernung führen. Im Gegensatz zu dem Verfahren von Weiss können bei der Schattenkantendetektion nur Farbbilder behandelt werden. Die Retinex-Schattenentfernung arbeitet aber auch auf Grauwertbildern. Durch die Schattenentfernung mit dem Retinex können nur Schatten, die keinen breiten Halbschattenbereich aufweisen, richtig entfernt werden. Außerdem hängt die Qualität der Schattenentfernung davon ab, ob die Schattenregion ausreichend von schattenfreien Flächen umgeben ist.

In der Arbeit wurde alternativ auch die Schattenentfernung durch die Reintegration nach Weiss untersucht. Die Qualität der Ergebnisse in dieser Arbeit ist mit denen der Retinex-Schattenentfernung vergleichbar. Bei der Reintegration nach Weiss besteht aber ein enormer Laufzeit-Vorteil, sodass dieses Verfahren die bessere Alternative zur Schattenentfernung bei gegebenem Schattenkantenbild darstellt.

Kapitel 8

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde das Verfahren von Finlayson et al. [FHD02b] zur Schattenentfernung in einzelnen Farbbildern unter Verwendung des Retinex-Algorithmus in C++ umgesetzt und modifiziert. Für die erforderliche Detektion von Schattenkanten wurde das Verfahren nach Finlayson et al. [FHD02a] implementiert. Zur Bestimmung des benötigten invarianten Winkels, wurde zunächst das Verfahren der Entropieminimierung von Finlayson et al. [FDL04] umgesetzt. Bei den Campusbildern der Netzwerkkamera führte das Verfahren zu keinen brauchbaren Ergebnissen. Im Rahmen der qualitativen Untersuchung wurden 70 Campusbilder ausgewertet. Für die berechneten Winkel ergab sich eine Standardabweichung von 19,67 Grad. Dieser Wert ist sehr hoch, denn da der Winkel eine kameraspezifische Eigenschaft beschreibt, sollte sich immer annähernd der gleiche Wert ergeben. Außerdem sind auf einigen der resultierenden invarianten Grauwertbilder die Schattenkanten noch deutlich erkennbar. Die Netzwerkkamera erfüllt die Annahmen des Verfahrens, wie Linearität und perfekte Schmalbandigkeit, nicht. Daher wurde zur Bestimmung des invarianten Winkels die von Finlayson et al. vorgeschlagene Kamerakalibrierung [FHD02a] durchgeführt, um dabei zu prüfen, ob die Kamera überhaupt für das Verfahren geeignet ist. Finlayson et al. [FHD02a] verwenden mehrere, über den Tag verteilt erstellte, Außen- aufnahmen des Macbeth ColorChecker® für die Kalibrierung. Dies erfordert eine portable Kamera, sowie die nötige Zeit um verschiedene Beleuchtungssituationen zu erhalten. In dieser Arbeit wurde anhand verschiedener Experimente gezeigt, dass die Kalibrierung

auch mit künstlichen Lichtquellen realisiert werden kann. Mit einem Beleuchtungsstärkemessgerät wurden die (x,y) -Chromatizitätskoordinaten verschiedener künstlicher Lichtquellen gemessen. Alle Lichtquellen erfüllen die nötige Voraussetzung, dass die ermittelten Koordinaten nahe der Planck'schen Ortskurve liegen. Außerdem zeigen die Chromatizitätskoordinaten einer gedimmten Glühbirne, dass so verschiedene Farbtemperaturen erreicht werden. Für die Kalibrierung der Netzwerkkamera war die Verwendung von nur drei Dimmstufen der Glühbirne und der Standardlichtart A aus der Pantone Lichtbox bereits ausreichend, um die invariante Richtung zu schätzen. Der kalibrierte Winkel weicht nur um 0,6 Grad von dem anhand von Tageslichtaufnahmen kalibrierten Winkel ab. Der Vorteil der Kalibrierung mit künstlichen Lichtquellen ist der deutlich geringere Aufwand. Die Untersuchung der Ergebnisse der Kalibrierung der Netzwerkkamera hat ergeben, dass diese prinzipiell für das Verfahren zur Berechnung der invarianten Darstellung geeignet ist. Die qualitative Untersuchung des Verfahrens zur Schattendetektion führte dennoch zu dem Ergebnis, dass dieses nicht für die Campusbilder geeignet ist. Die in den Campusbildern enthaltenen JPEG-Artefakte werden bei der Berechnung der invarianten Darstellung verstärkt, sodass die zur Schattendetektion benötigte zuverlässige Detektion von Kanten im invarianten Bild nicht möglich ist. Die Campusbilder sind generell auch wenig geeignet für das Verfahren, da die Szenen oft benachbarte achromatische Flächen enthalten.

Für die Durchführung von Laborexperimenten wurde eine Firewire Kamera kalibriert, die das zugrunde liegende Bildentstehungsmodell besser erfüllt und unkomprimierte Bilder liefert. Bei den Laborbildern führt das nach Finlayson et al. [FHD02a] implementierte Verfahren zur Schattenkantendetektion dazu, dass einige Materialkanten fälschlicherweise als Schattenkante klassifiziert werden, da Flächen unterschiedlicher Reflektanz auf denselben invarianten Wert abgebildet werden. Zur Reduzierung der Fehlklassifikationen wurde das Verfahren angepasst: Detektierte Schattenkantenpixel, an deren Stelle sich im Kantenbild des Farbton-Kanals der HSV-Darstellung eine starke Kante befindet, werden verworfen. Dabei wird einschränkend angenommen, dass sich die Lichtquellen nicht stark in der Farbe unterscheiden. Falls diese Annahme nicht erfüllt ist, können Schattenkantenpixel fälschlicherweise verworfen werden. Bei den Laboraufnahmen führte die Anpassung aber zu einer erheblichen Reduzierung der Artefakte in den Ergebnisbildern der Schattenentfernung. Dies konnte auch anhand des in der Arbeit definierten Maßes zur Bewertung der

Erzeugung von Artefakten festgestellt werden: Im Mittel ist die Erhöhung der mittleren Gradientenabstände außerhalb des Schattens etwa 22 Prozentpunkte geringer als bei den Ergebnissen ohne Einbeziehung der Farbton-Information.

Die Umsetzung der Schattenentfernung mit dem Retinex orientiert sich im Wesentlichen an dem von Finlayson et al. vorgestellten Verfahren [FHD02b]. Zur ausreichenden Mittelung eines Pixelwerts wurde die Idee von Brainard und Wandell [BW86] der Verwendung eines Akkumulatorarrays aufgegriffen. Der pfadbasierte Retinex-Algorithmus führt in der ursprünglichen Version eine Farbkorrektur von Pixelwerten durch. Im Kontext der Schattenentfernung ist nur die Korrektur der Pixelwerte im Schatten erwünscht, die übrigen Pixelwerte sollen erhalten bleiben. Der Vorschlag von Finlayson et al. [FHD02b] zur Einschränkung der Farbkorrektur erfordert eine Vergrößerung des Eingabebildes, sodass der bereits hohe Rechenaufwand weiter ansteigt. Das Verfahren zur Schattenentfernung wurde in dieser Arbeit durch eine einfache Anpassung des Reset-Schritts so angepasst, dass keine Farbkorrektur durchgeführt und der Rechenaufwand nicht erhöht wird. Der Algorithmus stellt so im Grunde einfach ein Verfahren zur eindimensionalen Reintegration von Kanteninformation dar. Zur Darstellung ist außerdem keine weitere Verarbeitung, wie eine Korrektur der Beleuchtung bei Finlayson et al. [FHD02b], nötig.

Anhand der Campusbildsequenzen wurde ein qualitativer Vergleich der Retinex-Schattenentfernung und des Verfahrens von Weiss zur Schattenentfernung in Bildserien [Wei01] vorgenommen. Wie bereits erläutert, konnte die zur Retinex-Schattenentfernung erforderliche Schattenkantendetektion auf den Campusbildern nicht durchgeführt werden. Mit dem Verfahren von Weiss lassen sich für registrierte Bildsequenzen gute Ergebnisse erzielen, wenn bestimmte Voraussetzungen erfüllt sind: Damit Schatten entfernt werden können, müssen die Beleuchtungsverhältnisse von Bild zu Bild ausreichend wechseln. Außerdem sollten über die Sequenz keine kontinuierlichen Schwankungen des Szeneninhalts an derselben Bildposition auftreten, da sonst Artefakte entstehen. Da der Campus teilweise sehr belebt ist und die Bewegungen oft von wechselnden Beleuchtungsverhältnissen abhängen, ist es teilweise schwierig, solche Sequenzen auf Basis der vorliegenden Campussequenzen zu erstellen.

In dieser Arbeit wurde ein erster Ansatz zur quantitativen Bewertung von Verfahren zur Entfernung von Schlagschatten anhand von drei technischen Bewertungsmaßen vorge-

stellt. Es wurde gezeigt, wie mit Hilfe von kontrollierten Aufnahmen im Labor, die zur Ergebnisauswertung erforderlichen Ausgangs- und Ground-Truth Daten erzeugt werden können. Die benötigten Ground-Truth Schattenpositionen werden automatisch, ohne manuelle Segmentierung, berechnet. Dabei wird erwartet, dass scharfe Schattenkanten vorliegen und dass der Schatten auf einer Ebene liegt. Anhand von Experimenten wurde festgestellt, dass die beiden Maße der prozentualen Abweichung des Gradientenabstands im Bereich der Schattenkanten und innerhalb der Schattengrenzen einen Vergleich von Ergebnissen hinsichtlich der Qualität der Schattenentfernung in Einzelbildern ermöglichen. Das dritte Maß der prozentualen Abweichung des Gradientenabstands außerhalb der Schattenregionen ermöglicht die Bewertung bezüglich der Erzeugung von Artefakten bei der Schattenentfernung. Es wurde auf die Problematik hingewiesen, dass die ersten beiden Maße beeinflusst werden können, wenn starke Artefakte vorliegen. Positive Abweichungen im Bereich der Schattenkante oder im Schatten können aber darauf hinweisen, dass die Werte aufgrund von starken Artefakten nicht aussagefähig sind. Um wirklich nur die Schattenentfernung, unabhängig von der Schattendetektion, zu bewerten, kann eine Ground-Truth Schattenkante verwendet werden. Die Beurteilung der Aussagefähigkeit der Maße stützt sich auf den Vergleich der quantitativen Bewertung verschiedener Ergebnisse mit meiner subjektiven Bewertung der Ergebnisse. Von umfangreichen Benutzertests, die im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich waren, ist aber eine Bestätigung der Erkenntnisse zu erwarten. Neben Schattenentfernung und Artefaktminimierung wurde in dieser Arbeit der Erhalt von Strukturen im Schattenkantenbereich als weitere Anforderung an Verfahren zur Schattenentfernung genannt. Ein möglicher Strukturverlust ist bei den Laborbildern nicht bemerkbar, da die Szene aus homogenen Flächen aufgebaut ist. Daher konnte hier der Einfluss auf das Maß im Bereich der Schattenkante nicht untersucht werden.

Für den quantitativen Vergleich des umgesetzten Verfahrens zur Schattendetektion und Retinex-Schattenentfernung mit dem Verfahren von Weiss [Wei01] wurde die prozentuale Abweichung der Gradientenabstände der Ergebnisse von Weiss von den Gradientenabständen des für die jeweilige Sequenz besten Ergebnisses der Retinex-Schattenentfernung berechnet. Bei Weiss sind die Gradientenabstände im Bereich der Schattenkante im Mittel etwa 13, innerhalb des Schattens etwa 27 und außerhalb des Schattens etwa 15 Prozent geringer. Die Schattenkante und besonders der Kernschatten wird durch das Verfahren von

Weiss besser entfernt, außerdem werden bei Weiss keine Artefakte erzeugt. Des Weiteren wurde anhand der drei Maße der prozentualen Abweichung des Gradientenabstands ein quantitativer Vergleich der Retinex-Schattenentfernung und der Schattenentfernung durch Reintegration nach Weiss bei gegebenem Schattenkantenbild vorgenommen. Für die Laborbilder ergaben sich bei der Retinex-Schattenentfernung geringfügig bessere Ergebnisse. Aufgrund des breiten Halbschattenbereichs wird bei beiden Verfahren zwar die Schattenkante abgeschwächt, aber der Kernschatten nicht gut entfernt. Anhand der Bewertung der Weiss-Reintegration mit abschließender Skalierung der Pixelwerte, wurde gezeigt, dass eine Skalierung die differentiellen Bewertungsmaße stark beeinflusst. Außerhalb des Schattens ergab sich z. B. eine Erhöhung der Abweichung der Gradientenabstände um etwa 23 Prozentpunkte. Der Vergleich von Verfahren mit und ohne Skalierung ist daher schwierig. Falls der Aspekt der Farbtreue ein wichtiges Kriterium für ein gutes Ergebnis darstellt, kann der Einfluss auf die Maße aber auch gewünscht sein.

Anhand der qualitativen und der quantitativen Untersuchung wurde im letzten Kapitel eine umfassende vergleichende Bewertung der Verfahren vorgenommen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Verfahren von Weiss die bessere Alternative darstellt, wenn Bildsequenzen einer statischen Szene mit bewegten Schatten vorliegen. Für Einzelbilder sind die Ergebnisse der Retinex-Schattenentfernung und der Reintegration nach Weiss vergleichbar, aber bei Weiss besteht ein enormer Laufzeit-Vorteil. Um den Rechenaufwand der Retinex-Schattenentfernung zu reduzieren, könnte aber das pixelweise Vorgehen des Algorithmus genutzt werden: Angenommen nicht nur die Schattenkantenpixel sind gegeben, sondern alle Schattenpixel. Dann müssen nur noch für jedes Pixel im Schatten Pfade verfolgt und gemittelt werden. Die übrigen Pixelwerte außerhalb des Schattens bleiben erhalten. Je nach Größe der Schattenregionen, könnte der Aufwand so erheblich reduziert werden. Zur Detektion von Schattenregionen basierend auf bekannten Schattenkanten könnte z. B. ein Verfahren von Fredembach und Finlayson [FF05] erprobt werden. Wenn die Pfadstartpunkte zudem so gewählt werden, dass sie außerhalb des Schattens liegen, kreuzen alle Pfade die Schattenkante und tragen zur Korrektur des Pixelwerts bei, was eine zusätzliche Reduzierung von Pfaden pro Pixel ermöglicht.

Anhang A

Nebenrechnungen

Im Folgenden sind die Nebenrechnungen zu Abschnitt 4.1.1 aufgeführt.

Berechnung von Gleichung 4.12 ausgehend von Gleichung 4.11:

$$\chi'_k = \ln(f^{(k)}) - \ln(\mu) \quad (\text{A.1})$$

$$= \ln(f^{(k)}) - \frac{1}{3} \sum_{i \in \{r, g, b\}} \ln(f^{(i)}) \quad (\text{A.2})$$

$$= \ln(I) + \ln(c_1 \lambda_k^{-5} \rho(\lambda_k)) - \frac{c_2}{T \lambda_k} - \left(\frac{1}{3} \sum_{i \in \{r, g, b\}} (\ln(I) + \ln(c_1 \lambda_i^{-5} \rho(\lambda_i)) - \frac{c_2}{T \lambda_i}) \right) \quad (\text{A.3})$$

$$= \ln(c_1 \lambda_k^{-5} \rho(\lambda_k)) - \frac{c_2}{T \lambda_k} - \left(\frac{1}{3} \sum_{i \in \{r, g, b\}} (\ln(c_1 \lambda_i^{-5} \rho(\lambda_i)) - \frac{c_2}{T \lambda_i}) \right) \quad (\text{A.4})$$

$$= \ln(c_1 \lambda_k^{-5} \rho(\lambda_k)) - \frac{1}{3} \ln \left(\prod_{i \in \{r, g, b\}} (c_1 \lambda_i^{-5} \rho(\lambda_i)) \right) - \frac{c_2}{T \lambda_k} + \frac{1}{3} \sum_{i \in \{r, g, b\}} \left(\frac{c_2}{T \lambda_i} \right) \quad (\text{A.5})$$

$$= \ln \left(\frac{c_1 \lambda_k^{-5} \rho(\lambda_k)}{\sqrt[3]{\prod_{i \in \{r, g, b\}} (c_1 \lambda_i^{-5} \rho(\lambda_i))}} \right) + \frac{1}{T} \left(\frac{-c_2}{\lambda_k} + \frac{1}{3} \sum_{i \in \{r, g, b\}} \left(\frac{c_2}{\lambda_i} \right) \right) \quad (\text{A.6})$$

Mit $\rho'_j = c_1 \lambda_j^{-5} \rho(\lambda_j)$ und $\mu_\rho = \sqrt[3]{\prod_{i \in \{r, g, b\}} \rho'_i}$ und $\Lambda_j = \frac{-c_2}{\lambda_j}$ und $\mu_\Lambda = \frac{1}{3} \sum_{i \in \{r, g, b\}} \Lambda_i$ ergibt sich für die 3 Komponenten:

$$\chi'_k = \ln\left(\frac{\rho'_k}{\mu_\rho}\right) + \frac{1}{T}(\Lambda_k - \mu_\Lambda), \quad \text{mit } k \in \{r, g, b\} \quad (\text{A.7})$$

$$(\text{A.8})$$

Mit $\mathbf{u}' = \left(\ln\left(\frac{\rho'_r}{\mu_\rho}\right), \ln\left(\frac{\rho'_g}{\mu_\rho}\right), \ln\left(\frac{\rho'_b}{\mu_\rho}\right)\right)^T$ und $\mathbf{v}' = (\Lambda_r - \mu_\Lambda, \Lambda_g - \mu_\Lambda, \Lambda_b - \mu_\Lambda)^T$ ergibt sich die Darstellung einer Geraden im dreidimensionalen Raum:

$$\boldsymbol{\chi}' = \mathbf{u}' + \frac{1}{T} \mathbf{v}' \quad (\text{A.9})$$

Matrix A zur Transformation der 3-D Vektoren $\boldsymbol{\chi}'$ in 2-D Vektoren $\boldsymbol{\chi}$ im Geometric Mean 2-D Chromatizitäts-Raum (Gleichung 4.13) [Ebn07]:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & 0 \\ -\sqrt{\frac{1}{6}} & -\sqrt{\frac{1}{2}} \\ -\sqrt{\frac{1}{6}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \quad (\text{A.10})$$

Anhang B

Kameraeinstellungen und Parameterbelegungen

B.1 Kameraeinstellungen

Tabelle B.1 und B.2 listen die wichtigsten Einstellungen der Netzwerk- und der Firewire-Kamera auf, die bei der Aufnahme der Bilder für die Experimente und die Kalibrierung in Kapitel 7 verwendet wurden.

B.2 Parameterbelegungen

Tabelle B.3 listet alle Parameter und deren Belegung für die Basiskonfiguration des Algorithmus zur Schattenkantendetektion und zur Schattenentfernung mit dem Retinex auf. Die Basiskonfiguration ist die Grundlage der in Abschnitt 7.4.2, Tabelle 7.3, genannten Konfigurationen zur Durchführung der Experimente. Die Bezeichnungen der Parameter entsprechen den Bezeichnungen, die im Hauptteil der Arbeit verwendet werden, wenn der Parameter dort erwähnt wird. Tabelle B.4 listet die zur Detektion der Ground-Truth Schattenkanten- und Schattenregionenbilder (s. Abschnitt 7.4.1, Struktogramm in Abbildung 7.11) verwendete Parameterkonfiguration auf. Die Belegung der Parameter

Merkmal	Wert
Speicherformat	JPEG
Auflösung	352 x 288
Color	Color Level 4
Compression	Medium
White Balance	Outdoor
Brightness	7
Sharpness	260
Exposure Mode	Auto
Shutter Speed	1/50
Gain	10 dB

Tabelle B.1: Einstellungen der AXIS 200+ CCD Farbnetzwerkkamera von AXIS Communications bei der Kalibrierung und der Aufnahme der Campussequenzen.

zur Berechnung des Schattenkantenbilds s_{gt} (s. Abschnitt 7.4.1, Struktogramm in Abbildung 7.12) ist in Tabelle B.5 aufgeführt.

Merkmal	Wert	Anmerkung
Objektiv	Pentax TV Lens 8.5 mm, 1:1.5	
Speicherformat	ppm	
Auflösung	1024 x 768	
AutoExp	off	
Shutter	manuell: 51	21 für Laboraufnahmen
Gain	manuell: 180	entspricht 0 dB
White Balance Blue/U Red/V	manuell: 32 manuell: 32	entspricht 4 dB Verstärkung für Rot, Grün und Blau
Brightness	manuell: 0	neutrale Einstellung
Hue	manuell: 180	neutrale Einstellung
Saturation	manuell: 127	Standard-Einstellung
Gamma	manuell: 10	entspricht Gamma Faktor 1, keine Gamma-Korrektur

Tabelle B.2: Einstellungen der CCD Firewire Farbkamera DFK31BF03 von The Imaging Source, AGAS Inventar-Nummer 000027, bei der Kalibrierung und der Aufnahme der Laborsequenzen.

Parameter	Beschreibung	Wert
Schattenkantendetektion		
α	Invarianter Winkel	57.0
hue	Flag, das angibt, ob der Hue-Kanal berücksichtigt wird	true
Bilaterale Filterung des Farbbilds		
w_{col}	Fenstergröße des Filters	5
$\sigma_{d_{col}}$	Sigma der Gauß-Abstandsfunktion	20.0
$\sigma_{r_{col}}$	Sigma der Gauß-Ähnlichkeitsfunktion	20.0
Bilaterale Filterung des Invarianten Bilds		
w_{inv}	Fenstergröße des Filters	5
$\sigma_{d_{inv}}$	Sigma der Gauß-Abstandsfunktion	20.0
$\sigma_{r_{inv}}$	Sigma der Gauß-Ähnlichkeitsfunktion	10.0
Canny Kantendetektion auf dem Farbbild		
σ_{col}	Sigma der Gauß-Glättung	0.64
$\theta_{h_{col}}$	Oberer Schwellwert beim Hysteresis-Threshold Verfahren	0.8
$\theta_{l_{col}}$	Unterer Schwellwert beim Hysteresis-Threshold Verfahren	0.3
$w_{c_{col}}$	Fenstergröße des Filters	9
Canny Kantendetektion auf dem Invarianten Bild		
σ_{inv}	Sigma der Gauß-Glättung	0.7
$\theta_{h_{inv}}$	Oberer Schwellwert beim Hysteresis-Threshold Verfahren	0.9
$\theta_{l_{inv}}$	Unterer Schwellwert beim Hysteresis-Threshold Verfahren	0.3
$w_{c_{inv}}$	Fenstergröße des Filters	9
Canny Kantendetektion auf dem Hue Kanal		
σ_{hue}	Sigma der Gauß-Glättung	0.6
$\theta_{h_{hue}}$	Oberer Schwellwert beim Hysteresis-Threshold Verfahren	0.9
$\theta_{l_{hue}}$	Unterer Schwellwert beim Hysteresis-Threshold Verfahren	0.6
$w_{c_{hue}}$	Fenstergröße des Filters	9
Retinex-Schattenentfernung		
pn	Pfadanzahl	20
pl	Pfadlänge	128
rd	Rekursionstiefe	3
d	Mittelpunkt-Offset	20

Tabelle B.3: Basiskonfiguration des Algorithmus zur Schattenkantendetektion und zur Schattenentfernung mit dem Retinex.

Parameter	Beschreibung	Wert
Bilaterale Filterung		
w_s	Fenstergröße des Filters	5
σ_{d_s}	Sigma der Gauß-Abstandsfunktion	40.0
σ_{r_s}	Sigma der Gauß-Ähnlichkeitsfunktion	60.0
Canny Kantendetektion		
σ_s	Sigma der Gauß-Glättung	3.7
θ_{h_s}	Oberer Schwellwert beim Hysteresis-Threshold Verfahren	0.9
θ_{l_s}	Unterer Schwellwert beim Hysteresis-Threshold Verfahren	0.8
w_{c_s}	Fenstergröße des Filters	9
Binarisierung		
t	Schwellwert	40

Tabelle B.4: Parameterkonfiguration zur Ground-Truth Schattendetektion.

Parameter	Beschreibung	Wert
Bilaterale Filterung		
w_s	Fenstergröße des Filters	5
σ_{d_s}	Sigma der Gauß-Abstandsfunktion	20.0
σ_{r_s}	Sigma der Gauß-Ähnlichkeitsfunktion	20.0
Canny Kantendetektion		
σ_s	Sigma der Gauß-Glättung	0.64
θ_{h_s}	Oberer Schwellwert beim Hysteresis-Threshold Verfahren	0.8
θ_{l_s}	Unterer Schwellwert beim Hysteresis-Threshold Verfahren	0.3
w_{c_s}	Fenstergröße des Filters	9

Tabelle B.5: Parameterkonfiguration zur Berechnung des Ground-Truth Schattenkantenbilds s_{gt} .

Anhang C

Eingabebilder

C.1 Campusesequenzen

Abbildung C.1 zeigt die Eingabesequenzen, die beim Verfahren von Weiss zu den Ergebnissen in Abbildung 7.8 führen. Die zweite Sequenz ist registriert. Die gesamte registrierte Sequenz enthält leider nur Aufnahmen, bei denen sich die Schattenkante an derselben Position befindet. Um die Schattenentfernung zu demonstrieren, wurden hier daher drei Aufnahmen ohne Schatten und nur zwei mit Schatten in die Eingabesequenz aufgenommen.

C.2 Laborsequenzen

In den Abbildungen C.2 und C.3 sind die Basislaborsequenzen dargestellt, die für die Experimente in Abschnitt 7.4 aufgenommen wurden. Tabelle C.1 listet die Einzelbilder der jeweiligen Basissequenz auf, die für die Erstellung von insgesamt 7 Sequenzen verwendet wurden.



Abbildung C.1: Campusbildsequenzen.

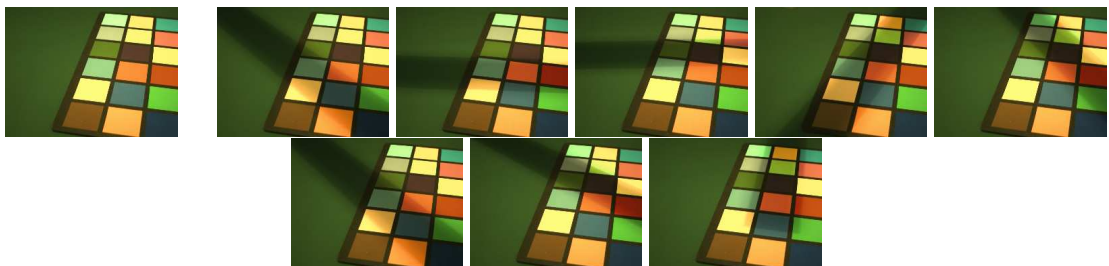


Abbildung C.2: Laborszene 1 und Basissequenz 1 mit 8 Bildern der Szene mit wechselndem Schatten.

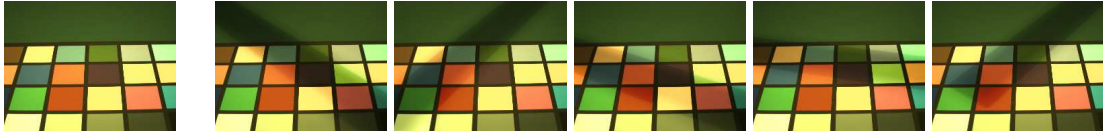


Abbildung C.3: Laborszene 2 und Basissequenz 2 mit 5 Bildern der Szene mit wechselndem Schatten.

Sequenz	Basissequenz	Zugehörige Einzelbilder
1.1	1	1, 2, 3
1.2	1	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
1.3	1	5, 6, 7
1.4	1	4, 8
2.1	2	1, 3, 4
2.2	2	1, 2, 3, 4, 5
2.3	2	2, 4, 5

Tabelle C.1: Zusammenstellung von 7 Bildsequenzen aus den Bildern der zwei aufgenommenen Basissequenzen.

Anhang D

Bilder des Laboraufbaus

Abbildung D.1 zeigt Bilder des Laboraufbaus zur Erzeugung der Ground-Truth und Ausgangsdaten (s. Abschnitt 7.4.1) zur quantitativen Bewertung. Links ist der gesamte Laboraufbau abgebildet. Das zweite Bild zeigt den 400 W Halogenstrahler zur Erzeugung von ambientem Licht. Rechts daneben ist die direkte Beleuchtung des ColorChecker® durch eine 100 W Glühbirne dargestellt. Die an einem Stativ befestigte Holzleiste verursacht einen Schlagschatten. Die Szene wird mit einer Firewire Kamera aufgenommen. Das Bild rechts zeigt die Abdeckung der Szene mit einer homogenen Fläche zur Ground-Truth Schattendetektion.



Abbildung D.1: Laboraufbau.

Anhang E

Technische Umsetzung

Die in der Diplomarbeit umgesetzten Algorithmen und Programme wurden in C++ mit Hilfe der Programmierumgebung PUMA¹ (Entwicklungszweig development-branch-0-99) implementiert. Als Entwicklungsplattform wurde openSUSE 10.2 mit dem C++-Compiler g++ (GCC) 4.1.2 verwendet. Für die Erstellung der GUI wurden die Klassenbibliothek Qt und der Qt-Designer (Open Source Edition Version 4.2.1) verwendet. Einige der implementierten Klassen bieten Methoden zur Visualisierung von Ergebnissen. Hierzu wird Gnuplot (Version 4.0) verwendet. Die jeweilige Methode erzeugt eine Datei mit den Gnuplot-Kommandos sowie die Dateien mit den zu plottenden Datensätzen und ruft Gnuplot zur Erzeugung des Plots im PNG-Format auf. Zur Ausführung und Weiterentwicklung des MATLAB-Codes von Weiss wurde Octave (Version 2.9.12) mit dem Zusatzpaket Octave forge Image package (Release 2007-05-26) verwendet. Zur Versionsverwaltung wurde Subversion (SVN) eingesetzt.

E.1 Installationsanleitung

Auf der beiliegenden CD sind im Verzeichnis `Programcode/C++` alle C++-Programme abgelegt. Die implementierten Klassen sind in den Unterverzeichnissen `Alg`, `Config`,

¹Programmierungsumgebung für die Musteranalyse der Arbeitsgruppe Aktives Sehen (<http://www.uni-koblenz.de/FB4/Institutes/ICV/AGPaulus/puma> [28.11.07]).

DataStructures, Eval und Tools zu finden. Der Quellcode der GUI ist im Unterverzeichnis Gui abgelegt. Alle Programme werden durch den Aufruf von make im Hauptverzeichnis Programmcode/C++ erzeugt. Für die Installation werden die Bibliotheken PUMA (development-branch-0-99) und Qt (Open Source Edition Version 4.2.1) benötigt. Zur Ausführung der Programme ist außerdem das Programm Gnuplot erforderlich.

Im Verzeichnis Programmcode/Octave sind die MATLAB- bzw. Octave-Skripte zu finden. Für deren Ausführung wird neben Octave (Version 2.9.12) auch das Zusatzpaket Octave forge Image package (Release 2007-05-26) benötigt. Um die Skripte außerhalb der Octave-Umgebung aufrufen zu können, wurden ausführbare Skripte erzeugt. Diese erwarten, dass die Octave-Binary unter /usr/local/bin/octave abgelegt ist. Ist dies nicht der Fall, muss der Pfad in der ersten Zeile des Skripts entsprechend angepasst werden.

E.2 Erweiterungen des MATLAB-Codes von Weiss

In den Abschnitten 3.2 und 6.2.4 wird erläutert, welche Anpassungen des Codes von Weiss² für die Experimente vorgenommen wurden. Im Folgenden werden die MATLAB- bzw. Octave-Funktionen, durch die der Nutzer den jeweiligen Algorithmus ausführen kann, kurz vorgestellt. Alle Quellcode-Dateien sind auf der beiliegenden CD zu finden (s. Anhang F). Diese sind ausführlich dokumentiert, wobei auch auf die Änderungen des originalen Codes von Weiss hingewiesen wird.

Funktionen und ausführbare Skripte

`removeShadowRGB` Diese Funktion realisiert den in Abschnitt 3.2 vorgestellten Algorithmus. Als Parameter wird der Pfad zu einem Verzeichnis erwartet, das eine Sequenz von Farbbildern eines wählbaren Formats enthält. Per Parameter kann gewählt werden, ob die Pixelwerte logarithmiert und ob die Ergebnispixelwerte abschließend linear skaliert werden. Das berechnete Reflektanzbild wird im gewünschten Verzeichnis abgelegt.

²<http://www.cs.huji.ac.il/~yweiss/intrinsic.tar> [28.11.07]

Das Skript `removeShadowRGB_exe` ruft diese Funktion auf und übergibt die benötigten Parameter.

`removeShadowRGB_single` Diese Funktion realisiert den in Abschnitt 6.2.4 vorgestellten Algorithmus zur Schattenentfernung, basierend auf einem Farbbild und dem zugehörigen Schattenkantenbild. Für beide Bilder wird der Dateiname per Parameter übergeben. Das Schattenkantenbild muss in einem Graubild-Format vorliegen. Für Pixel, die Schattenkantenpixel darstellen, wird der Wert 255 und für die übrigen Pixel der Wert 0 erwartet. Per Parameter wird gewählt, ob die Pixelwerte logarithmiert und ob die Ergebnispixelwerte linear skaliert werden. Das berechnete, schattenfreie Bild wird im gewünschten Verzeichnis abgelegt.

Das Skript `removeShadowRGB_single_exe` ruft diese Funktion auf und übergibt die benötigten Parameter.

E.3 GUI zur Kamerakalibrierung

Zur Durchführung der in Abschnitt 4.2.2 beschriebenen Kalibrierung wurde eine grafische Benutzeroberfläche erstellt. Durch die Klassen der GUI wird nur die Benutzerschnittstelle realisiert, für die eigentlichen Berechnungen der Kalibrierung verwendet das Programm die Klasse `InvariantDirectionCalibration` (s. Anhang E.4). Es folgt eine Anleitung zur Bedienung der Gui, die in Abbildung E.1 dargestellt ist.

Die grafische Oberfläche wird, nach erfolgreicher Installation, mit dem Aufruf `./Gui` im Verzeichnis `Programcode/C++/Gui` gestartet. Der Ablauf der Kalibrierung ist in drei Prozesse gegliedert:

Calibration point selection Über den Menüpunkt `File/Load calib image` wird ein Dateibrowser geöffnet, mit dem der Nutzer das Bild eines Kalibrieremusters im JPEG- oder PPM-Format auswählt. Das Bild wird im Fenster `Image display` angezeigt. Der Nutzer gibt im Textfeld `Number of patches` die Anzahl der auszuwählenden Farbfelder an (Voreinstellung: 24). Mit der linken Maustaste klickt der Nutzer im Bild nacheinander, von links oben nach rechts unten, die Mittelpunkte der Farbfelder an. Bei je-

dem Klick wird ein gelbes Auswahlquadrat dargestellt, das den ausgewählten Bereich eingrenzt. Abbildung E.1 zeigt exemplarisch neun Auswahlbereiche. Die Seitenlänge der ausgewählten Quadrate (Voreinstellung: 10 Pixel) kann über das Textfeld `Side length` angepasst werden. Wenn eine Korrektur der Auswahlbereiche gewünscht ist, können die ausgewählten Bereiche über den Button `Reset last point` schrittweise, vom letzten bis zum ersten, gelöscht werden. Wenn in allen Farbfeldern ein Bereich ausgewählt wurde, wird über den Button `Generate output file` eine Ausgabedatei erzeugt. Der Dateiname, der mit `.dat` enden muss, kann im Textfeld `Output file` angegeben werden. Standardmäßig wird die Datei im Verzeichnis des gewählten Bildes angelegt, wobei sich der Dateiname aus dem Namen des Bildes und der Endung `.dat` ergibt. Die erzeugte Datei ist wie folgt aufgebaut: In der ersten Zeile ist der Pfad zum Kalibrierbild, in der zweiten Zeile die Seitenlänge der Auswahlbereiche in Pixeln angegeben. In den folgenden Zeilen werden nacheinander die y - und x -Pixelkoordinaten³ der linken oberen Ecke der Auswahlquadrate, in der vom Nutzer gewählten Reihenfolge, aufgelistet.

Wie beschrieben wird mit mehreren Kalibrierenaufnahmen verfahren, sodass eine Menge von Kalibrierdateien erzeugt wird. Die gewählten Koordinaten der Kalibrierdateien sind somit gespeichert und müssen für weitere Kalibrierungen nicht nochmals selektiert werden. Damit eine Kalibrierung anhand der Dateien erfolgen kann, ist es wichtig, dass bei der Auswahl der Farbfelder immer die gleiche Reihenfolge, von links oben nach rechts unten, eingehalten wird.

Create calib data collection file Für eine konkrete Kalibrierung müssen die Daten aus den gewünschten Kalibrierdateien in einer Datei zusammengefasst werden. Durch Wahl des Menüpunkts `File/Choose calib data files` wird ein Dateibrowser geöffnet, mit dem die zu verwendenden `*.dat` Kalibrierdateien ausgewählt werden. Über den Menüpunkt `File/Save calib data file` wird die Sammel-Kalibrierdatei, die alle Daten der ausgewählten Kalibrierdateien enthält, mit frei wählbarem Namen und Endung `.dat` im gewünschten Verzeichnis gespeichert.

³Der Ursprung des Koordinatensystems ist links oben im Bild, die y -Achse zeigt nach unten, die x -Achse nach rechts.

Calibration Um schließlich eine bestimmte Kalibrierung durchzuführen, wählt der Nutzer über den Menüpunkt `File/Choose calib data file` die gewünschte Sammel-Kalibrierdatei aus. Über den Menüpunkt `File/Choose result dir` wird das Verzeichnis gewählt, in dem die Ergebnisdateien der Kalibrierung angelegt werden sollen. Die Namen der erzeugten Dateien beginnen mit dem im Textfeld `Plot filename` angegebenen Präfix. Standardmäßig wird das Präfix `calib_x` verwendet, wobei `x` der Name der gewählten Sammel-Kalibrierdatei ist. Welche Dateien bei der Kalibrierung erzeugt werden, wird über die Checkboxes im `Calibration`-Bereich gewählt:

Calibration result file Eine Datei mit Endung `_result.txt`, in der der Pfad zur Sammel-Kalibrierdatei und folgende vier Ergebnisse aufgelistet sind: Der Vektor der invarianten Richtung, der orientierte Winkel zwischen der invarianten Richtung und der ersten Achse, der invariante Winkel sowie der mittlere quadratische Anpassungsfehler.

Plot of log chroma data Ein Bild im PNG-Format mit Endung `.png`, das die Koordinaten der Farbfelder, wie links in Abbildung 4.4 dargestellt, zeigt. Das Bild wird im Fenster `Image display` angezeigt.

Plot of achromatic log chroma data Ein Bild im PNG-Format mit der Endung `_achromaticPatches.png`, das die Koordinaten der Farbfelder 18 bis 23 zeigt. Beim Macbeth ColorChecker[®] mit 24 Feldern entsprechen diese den achromatischen Farbfeldern.

Plot of invariant values Ein Bild `invariantVariance.png`, das die mit dem kalibrierten, invarianten Winkel berechneten, invarianten Werte der Farbfelder unter verschiedenen Beleuchtungen darstellt (siehe z. B. Abbildung 7.4).

Die verwendete Klasse `InvariantDirectionCalibration` erzeugt die Plots mit Hilfe von Gnuplot. Die erzeugten Gnuplot-Quelldateien werden jeweils auch gespeichert. Mit Klick auf den Button `Calibrate` wird die Berechnung der Kalibrierung und die Erzeugung der gewünschten Dateien ausgelöst. Der berechnete, invariante Winkel wird unten im `Calibration`-Bereich angezeigt.

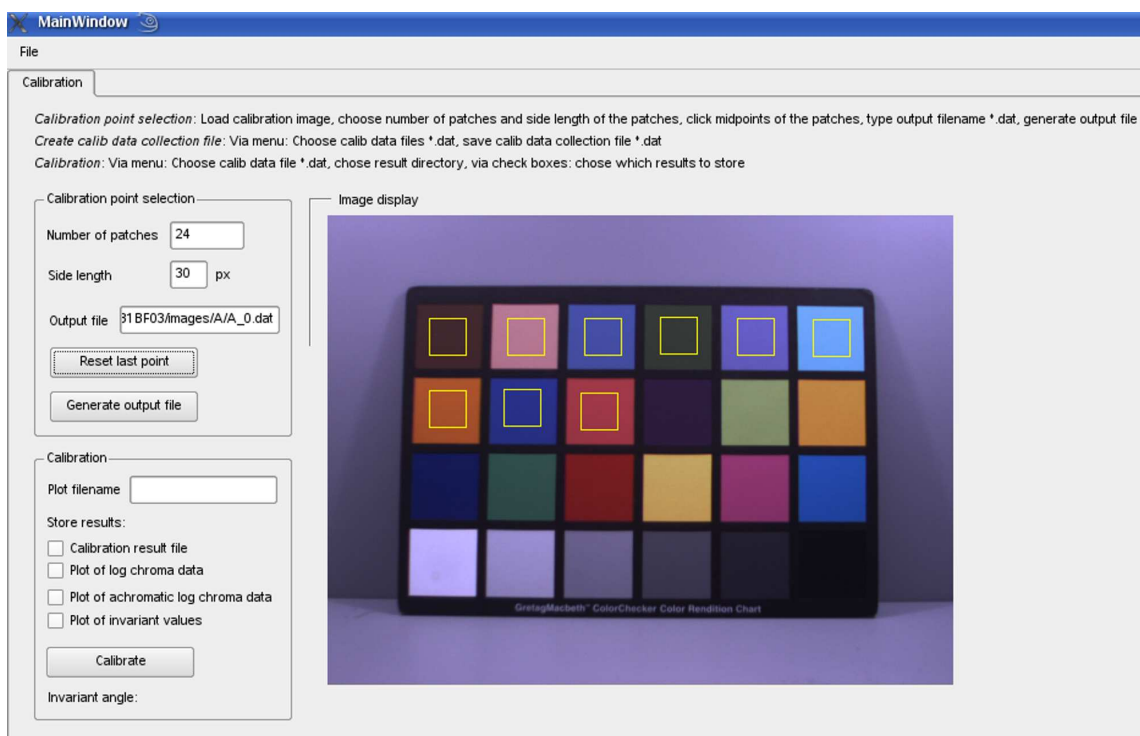


Abbildung E.1: GUI zur Kamerakalibrierung.

E.4 Schattendetektion und Schattenentfernung

Im Folgenden werden die zur Schattendetektion und Schattenentfernung mit dem Retinex implementierten Klassen und das Hauptprogramm aufgelistet. Die Kurzbeschreibungen liefern einen ersten Überblick, genauere Informationen zur Anwendung sind in den Kommentaren der Quellcode-Dateien zu finden. Aus der PUMA-Bibliothek werden die Bild-Datenstrukturen `ColorImage` für RGB-Farbbilder und `GrayLevelImage` für Grauwertbilder verwendet. Binärbilder, wie Schattenkanten- oder Schattenregionenbilder, werden auch als `GrayLevelImage` repräsentiert, wobei Schatten(kanten)pixel den Wert 255 und die übrigen Pixel den Wert 0 besitzen.

Datenstrukturen (Programmcodes/C++/DataStructures)

`LogChromaticityImage` Diese Klasse repräsentiert Log-Chromatizitäts-Bilder als zweidimensionale PUMA `Num_Matrix` von `double`-Werten. Schreibender und lesender Zugriff sind möglich, sowie die Transformation eines bestimmten Kanals in ein darstellbares `GrayLevelImage`.

Algorithmen (Programmcodes/C++/Alg)

`EntropyMinimization` Die Klasse implementiert den in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Algorithmus zur Berechnung des invarianten Winkels. Ein Log-Chromatizitäts-Bild vom Typ `LogChromaticityImage` wird als Eingabe erwartet, der verwendete Log-Chromatizitäts-Raum ist dabei nicht relevant. Die Klasse bietet Methoden zur Visualisierung der für jeden Winkel berechneten Entropiewerte mit Hilfe von Gnuplot und für die Ausgabe des berechneten Winkels in eine Textdatei.

`InvariantDirectionCalibration` Diese Klasse implementiert den Algorithmus zur Berechnung des invarianten Winkels durch Kalibrierung (Abschnitt 4.2.2). Als Eingabe wird der Name einer Sammel-Kalibrierdatei erwartet. In Abschnitt E.3 wird erläutert, wie diese Datei mit Hilfe der GUI erzeugt wird. Es werden mehrere Methoden zur Visualisierung der Ergebnisse durch Gnuplot zur Verfügung gestellt: Die Methode `plotLogChromaData()` realisiert die Erstellung eines Plots der Koordinaten der Farbfelder im 2-D Geometric Mean Chromatizitäts-Raum. Das Plotten der Koordinaten einer Auswahl von Farbfeldern wird durch die Methode `plotPatchLogChromaData()` realisiert. Die Methode `plotInvariantValues()` erzeugt einen Plot der invarianten Werte jedes Farbfelds, abhängig von der Beleuchtung. Eine Ausgabe der Kalibrierungsergebnisse in eine Textdatei ist durch die Methode `logResult()` möglich.

`LineFitting2D` Diese Klasse wurde aus meiner Studienarbeit [Ste06] übernommen. Sie realisiert die zweidimensionale Geradenanpassung, die bei der Kalibrierung verwendet wird.

`InvariantImageCalculation` Diese Klasse realisiert die Berechnung der invarianten Darstellung (Abschnitt 4.1) ausgehend von einem `LogChromaticityImage` und dem invarianten Winkel. Der verwendete Log-Chromatizitäts-Raum ist also nicht relevant.

Die Klasse stellt das berechnete invariante Bild als `Num_Matrix` von `double`-Werten, sowie das invariante Grauwertbild als `GrayLevelImage` zur Verfügung.

`ShadowEdgeDetection` Diese Klasse implementiert den Algorithmus zur Schattenkantendetektion (Abschnitt 4.3). Der Methode `computeShadowEdgeMap()` wird ein `ColorImage` und das zugehörige invariante Bild als `GrayLevelImage` übergeben. Ob die Hue-Information miteinbezogen wird und ob das Schattenkantenbild abschließend dilatiert wird, ist per Parameter wählbar. Zur Realisierung des Algorithmus werden neben Datenstrukturen aus PUMA die Klassen `Canny`, `BilateralFilter` und `Dilatation` verwendet.

`RetinexPathBased` Diese Klasse implementiert den Algorithmus zur Schattenentfernung mit dem pfadbasierten Retinex (Abschnitt 5.2.1, Struktogramm in Abbildung 5.5). Der Methode `removeShadow` wird ein Bild mit Schatten als `ColorImage` und das Schattenkantenbild als `GrayLevelImage` übergeben. Das schattenfreie Bild wird als `ColorImage` zurückgeliefert. Die benötigten Parameter werden dem Konstruktor übergeben. Die Methode `plotBrownianPaths` ermöglicht das Plotten der Brown'schen Pfade.

Tools (Programcode/C++/Tools)

`GrayValueTransformation` Die Methode `linearStretching()` dieser Klasse transformiert eine `Num_Matrix` aus `double`-Werten durch lineare Skalierung in ein `GrayLevelImage`. Optional werden die Werte vor der Skalierung exponentiert.

`ImageConverter` Diese Klasse stellt Methoden zur Konvertierung von Bildern zur Verfügung. Die Methode `rgbToLogChromaticity()` realisiert die Transformation eines `ColorImage` in ein `LogChromaticityImage`, das logarithmische Kanalverhältnisse enthält (s. Abschnitt 4.1). Der Kanal im Nenner kann per Parameter gewählt werden. Die Methode `rgbToGeometricMeanLogChromaticity()` dient der Transformation eines `ColorImage` in ein `LogChromaticityImage`, das Koordinaten im Geometric Mean 2-D Chromatizitäts-Raum beschreibt (s. Abschnitt 4.1.1).

Programm (Programmcode/C++/)

`main` Diesem Programm wird als Kommandozeilenparameter der Pfad zu einem Farbbild übergeben. Für dieses wird die Detektion der Schattenkanten und die Schattenentfernung mit dem Retinex ausgeführt. Die Ergebnisse, das Schattenkantenbild und das schattenfreie Bild, werden im übergebenen Verzeichnis abgelegt. Als optionaler Parameter kann ein Verzeichnis für Zwischenergebnisse angegeben werden. Die benötigte Konfiguration von Parametern wird aus einer der Setup-Datei (s. Anhang E.5) ausgelesen. Wenn der Wert des invarianten Winkels dort negativ ist, wird der Winkel unter Verwendung der Klasse `EntropyMinimization` bestimmt.

E.5 Skriptbasierte Evaluation

Im Folgenden werden die Komponenten vorgestellt, die zur Durchführung der Experimente und zur Evaluation der Ergebnisse entwickelt wurden. Auch hier wird nur ein Überblick geschaffen. Die Klassen, Programme und Shell-Skripte sind zur konkreten Anwendung jeweils ausführlich dokumentiert.

Konfiguration Zur Konfiguration der benötigten Parameter (s. Anhang B.2) wird die Klasse `SetupIO` verwendet. Diese ist im Verzeichnis `Programmcode/C++/Config` abgelegt. Die Klasse wurde aus dem Robbie 5 Projekt⁴ übernommen. Sie stellt Methoden zum Lesen von Parameter-Werten aus einer Setup-Datei zur Verfügung. Konkret wird die Datei `setup.dat`, die sich im Hauptverzeichnis `Programmcode/C++` befindet, verwendet. Der allgemeine Aufbau einer Setup-Datei ist in der Klasse `SetupIO` dokumentiert. Die Parameter sind direkt in `setup.dat` kommentiert.

Klassen Folgende Klassen, abgelegt unter `Programmcode/C++/Eval`, wurden für die Evaluation implementiert:

`GroundTruthShadowDetection` Diese Klasse realisiert den Algorithmus zur Detektion der Ground-Truth Schattenkante und Schattenregion ausgehend von den Farbbil-

⁴<http://serres.uni-koblenz.de/aswiki/index.php/Robbie-5> [28.11.07]

dern einer homogenen Fläche mit und ohne Schlagschatten (s. Abschnitt 7.4.1, Struktogramm in Abbildung 7.11).

`ShadowRemovalEvaluation` Mit dieser Klasse wird die Berechnung des mittleren Gradientenabstands zwischen einem schattenbefreiten Bild und einem Ground-Truth Bild realisiert. Der mittlere Gradientenabstand für das gesamte Bild und die mittleren Gradientenabstände im Bereich der Schattenkante, im Bereich innerhalb der Schattengrenzen und außerhalb der Schattengrenzen (s. Gleichung 6.3 bis 6.6) werden berechnet. Als Eingabe wird also auch das Ground-Truth Schattenkantenbild und das Ground-Truth Schattenregionenbild erwartet.

Programme Die folgenden Programme wurden zu Testzwecken und für die skriptbasierte Evaluation erstellt. Die Programme führen in der Regel keine Berechnungen durch, sondern verwenden die beschriebenen Klassen.

`combineShadowMap` Dieses Programm ermöglicht die Verknüpfung von Binärbildern mit den logischen Operatoren OR oder ANDNOT. Als Eingabe werden die Pfade zu zwei Grauwertbildern erwartet, die nur die Werte 0 und 255 enthalten. Das Ergebnisbild wird unter dem gewünschten Dateinamen abgelegt. Das Programm wird von dem Skript `script_weisseEval.sh` aufgerufen, um die kombinierten Ground-Truth Schattenkanten- und Schattenregionenbilder (Gleichung 6.13 und 6.14) zu berechnen.

`computeInvariantImage` Dieses Programm erwartet als Eingabe den Pfad zu einem Farbbild und den zugehörigen invarianten Winkel. Daraus wird das invariante Grauwertbild berechnet und im gewünschten Verzeichnis abgelegt.

`computeShadowGT` Dem Programm werden vier Dateinamen übergeben: Der Name eines Farbbilds, das eine homogene Fläche zeigt, eines Farbbilds, das diese Fläche mit Schlagschatten zeigt, sowie die Dateinamen für die Ergebnisbilder: Das Ground-Truth Schattenkanten- und das Schattenregionenbild. Die benötigten Parameter werden aus der Setup-Datei ausgelesen.

`detectShadowEdge` Dieses Programm führt die Schattenkantendetektion für ein gegebenes Farbbild aus und speichert das Ergebnisbild im gewünschten Verzeichnis ab. Die

benötigten Parameter werden aus der Setup-Datei ausgelesen. Wenn der Wert des Winkels negativ ist, wird er mit Hilfe der Klasse `EntropyMinimization` bestimmt.

`eval` Mit diesem Programm erfolgt die Bewertung des Ergebnisses einer Schattenentfernung. Dazu werden dem Programm folgende Daten übergeben: Der Dateiname des Ground-Truth Bilds der Szene, der Dateiname des schattenbefreiten Bilds, der Dateiname des Ground-Truth Schattenkantenbilds und des Ground Truth Schattenregionenbilds. Die berechneten mittleren Gradientenabstände werden in die Datei `evalResult.txt` im gewählten Verzeichnis geschrieben.

`evalEntropyMin` Dieses Programm dient der Ausführung der Entropieminimierung für ein Farbbild mit Schatten. Dessen Dateiname wird per Parameter übergeben. In einem wählbaren Verzeichnis werden das resultierende invariante Bild, die Datei mit dem berechneten invarianten Winkel und die Gnuplot Dateien zur Visualisierung der für jeden Winkel berechneten Entropie abgelegt.

`removeShadow` Mit diesem Programm wird für ein Farbbild die Schattenentfernung mit dem Retinex ausgeführt und das Ergebnis ausgewertet. Es sind zwei Modi zur Berechnung des benötigten Schattenkantenbilds möglich: Es wird, wie im Struktogramm in Abbildung 7.12 beschrieben, als Ground-Truth Schattenkantenbild berechnet oder durch Schattenkantendetektion mit der Klasse `ShadowEdgeDetection`. Der invariante Winkel wird aus der Setup-Datei ausgelesen. Wenn der Wert negativ ist, wird der Winkel mit der Klasse `EntropyMinimization` bestimmt. In einem als Kommandozeilenparameter übergebenen Verzeichnis werden Zwischenergebnisse und das Ergebnis der mit der Klasse `ShadowRemovalEvaluation` durchgeführten Evaluation abgelegt.

Shell-Skripte Um für eine Menge von Bildern die Ergebnisse des implementierten Verfahrens und des Verfahrens von Weiss zu berechnen und auszuwerten wurden Shell-Skripte entwickelt. Diese sind im Hauptverzeichnis `Programcode/C++` abgelegt.

`script_computeInvariantImage.sh` Für alle JPEG-Bilder in einem bestimmten Verzeichnis ruft das Skript das Programm `computeInvariantImage` mit dem als Parameter übergebenen invarianten Winkel auf. Die Ergebnisse werden jeweils in einem neu angelegten Verzeichnis mit dem Namen des jeweiligen Bildes abgelegt.

`script_evalEntropyMin.sh` Dieses Skript führt für alle JPEG-Bilder in einem bestimmten Verzeichnis das Programm `evalEntropyMin` aus. Die Ergebnisse werden jeweils in einem neu angelegten Verzeichnis mit dem Namen des jeweiligen Bildes abgelegt.

`script_computeShadowGT.sh` Das Skript erwartet als Parameter Pfade für ein Eingabe- und ein Ausgabeverzeichnis. Im Eingabeverzeichnis befinden sich ein Bild mit homogenem Hintergrund und mehrere Bilder dieser Szene mit Schlagschatten. Es wird ein bestimmtes Dateinamenmuster erwartet. Für jedes Schattenbild wird das Programm `computeShadowGT` ausgeführt, das die Ergebnisbilder im Ausgabeverzeichnis speichert.

`script_evalReference.sh` Das Skript ruft für jedes Schattenbild einer Bildsequenz in einem bestimmten Verzeichnis das Programm `eval` auf. Dem Skript muss neben dem Verzeichnis mit der Bildsequenz und dem Ground-Truth Bild der Szene ein Verzeichnis mit den Ground-Truth Schattenkanten- und Schattenregionenbildern übergeben werden. Für die einzulesenden Dateien wird ein bestimmtes Dateinamenmuster erwartet. Für jedes Schattenbild werden die Ergebnisse in einem Verzeichnis mit dem Namen des Bildes abgelegt.

`script_removeShadow.sh` Das Skript ruft für jedes Schattenbild einer Bildsequenz in einem bestimmten Verzeichnis das Programm `removeShadow` im gewählten Modus auf. Dem Skript muss neben dem Verzeichnis mit der Bildsequenz und dem Ground-Truth Bild der Szene ein Verzeichnis mit den Ground-Truth Schattenkanten- und Schattenregionenbildern übergeben werden. Für die einzulesenden Dateien wird ein bestimmtes Dateinamenmuster erwartet. Für jedes Schattenbild werden die Ergebnisse in einem Verzeichnis mit dem Namen des Bildes abgelegt.

`script_weisseVal.sh` Das Skript erwartet als Parameter den Pfad zu einem Verzeichnis, das eine Sequenz mit Bildern einer statischen Szene mit bewegtem Schatten enthält. Mit dem Pfad wird das Skript `removeShadowRGB_exe` (s. Anhang E.2) aufgerufen. Das Ergebnis der Schattenentfernung wird anhand des Skripts `eval` ausgewertet. Das benötigte Ground-Truth Schattenkanten- und Schattenregionenbild wird mit Hilfe des Programms `combineShadowMap` aus den zu den Schattenbildern der Bildsequenz gehörenden Schattenkanten- und Schattenregionenbildern berechnet. Diese befinden sich in

einem Verzeichnis, dessen Pfad als Parameter übergeben wird. Die Ergebnisse werden in einem gewählten Verzeichnis abgelegt.

`script_weiss_singleEval.sh` Das Skript ruft für jedes Schattenbild einer Bildsequenz in einem Verzeichnis, dessen Pfad als Parameter übergeben wird, das Skript `removeShadowRGB_single_exe` (s. Anhang E.2) auf. Benötigt wird dazu außerdem die Übergabe des Pfads zu einem Verzeichnis, das die zugehörigen Schattenkantenbilder enthält. Für jedes Ergebnis der Schattenentfernung wird das Skript `eval` aufgerufen. Dazu muss der Pfad zu dem Verzeichnis angegeben werden, das die Ground-Truth Schattenkanten- und Schattenregionenbilder enthält. Die Ergebnisse werden für jedes Schattenbild in einem extra Ordner in einem bestimmten Verzeichnis abgelegt.

Anhang F

Inhalte der CD

Im Folgenden ist die Verzeichnis-Struktur der CD bis zur zweiten Ebene aufgelistet.

```
Ausarbeitung/  
  Steinmetz2007.pdf  
  Arbeit/  
  VortragOberseminar/  
Programmcode/  
  C++/  
  Octave/  
Experimente/  
  Evaluation/  
  Kalibrierung/  
Literatur/  
Sonstiges/  
  FWS2007/  
  Plots/  
  WeissMATLAB/
```

Das Verzeichnis `Ausarbeitung` enthält die vorliegende Diplomarbeit als PFD. Im Unterverzeichnis `Arbeit` sind alle $\text{T}_\text{E}\text{X}$ -Quellen sowie die zugehörigen Bilder (im Verzeichnis `images`) enthalten. Alle $\text{T}_\text{E}\text{X}$ -Quellen und Bilder zum Oberseminar-Vortrag, sowie die

Vortragsfolien als PDF, sind entsprechend im Unterverzeichnis `VortragOberseminar` abgelegt.

Im Verzeichnis `Programmcode` sind im Unterverzeichnis `C++`, wie in Anhang E beschrieben, die `C++`-Quellcodedateien und Shell-Skripte enthalten. Im Unterverzeichnis `Octave` sind die von Yair Weiss übernommenen und erweiterten MATLAB- bzw. Octave-Skripte zu finden.

Das Verzeichnis `Experimente` enthält im Unterverzeichnis `Evaluation` die Ordner `DFK31BF03` und `WebcamAxis200`. Im ersten Ordner sind alle Laborausgangsdaten, deren Erzeugung in Abschnitt 7.4.1 beschrieben wurde, zu finden. Außerdem sind die daraus erzeugten Ergebnisse (Ground-Truth Daten und Ergebnisse der Algorithmen) enthalten. Im Tabellenkalkulation-Dokument `Ergebnisse.ods` sind alle Evaluationsergebnisse aufgelistet, anhand derer die in Abschnitt 7.4.3 vorgestellten, gemittelten Werte nachvollzogen werden können. Im Ordner `WebcamAxis200` sind die für die qualitative Bewertung (Abschnitt 7.3) gewählten Campusesequenzen und Einzelbilder sowie die daraus resultierenden Ergebnisse abgelegt. Im Dokument `Ergebnisse.ods` werden die Ergebnisse der Entropieminimierung (s. Abschnitt 7.2.1) aufgelistet.

Im Unterverzeichnis `Kalibrierung` sind die Ausgangs- und Ergebnisdaten der in Abschnitt 7.2 vorgestellten Kalibrierungen enthalten. Diese umfassen die Aufnahmen des Kalibrieremusters, die Sammel-Kalibrierdateien und die Ergebnis-Dateien und Plots. Außerdem sind dort die Ergebnisse der Vermessung der Lichtquellen (s. Abschnitt 4.2.2) zu finden.

Im Verzeichnis `Literatur` sind die zitierten Quellen, die frei verfügbar sind, als PDF enthalten. Der Dateiname entspricht dem jeweiligen Schlüssel aus der Literaturdatenbank des Fachbereichs 4.

Das Verzeichnis `Sonstiges` enthält im Unterordner `FWS2007` meinen Beitrag [SPH07] und den zugehörigen Vortrag zum 13. Workshop Farbbildverarbeitung 2007, der am 04. und 05. Oktober 2007 an der Universität Koblenz stattgefunden hat. Der Beitrag ist im Rahmen der Diplomarbeit entstanden.

Im Unterverzeichnis `Plots` sind Gnuplot-Quelldateien zu Grafiken, die in dieser Arbeit präsentiert werden, enthalten. Im Unterordner `WeissMATLAB` sind die originalen MATLAB-Skripte von Yair Weiss zu finden.

Literaturverzeichnis

- [AV05] ACEVES, H. ; VELAZQUEZ, H.: Scalings between physical and their observationally related quantities of merger remnants. In: *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica* (2005), Nr. 41, S. 523–532
- [Bar04] BARTSCH, Hans-Jochen: *Taschenbuch mathematischer Formeln*. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2004
- [BF00] BARNARD, Kobus ; FINLAYSON, Graham: Shadow Identification using Colour Ratios. In: *Proceedings of the IS&T/SID Eighth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications*, 2000, S. 97–101
- [BF02] BARNARD, Kobus ; FUNT, Brian V.: Camera characterization for color research. In: *Color Research and Application* 27 (2002), Nr. 3, S. 153–164
- [Bla83] BLAKE, A.: On Lightness Computation in the Modrian World. In: *Proceedings of the Wanner-Gren Conference on Central & Peripheral Mechanisms in Color Vision*. New York : Macmillan, 1983, S. 45–49
- [Bre63] BRESENHAM, Jack: An incremental algorithm for digital plotting. In: *ACM National Conference*, 1963
- [BS89] BRONSTEIN, Ilja N. ; SEMENDJAJEW, Konstantin A.: *Taschenbuch der Mathematik*. Thun und FrankfurtMain : Harri Deutsch, 1989
- [BT78] BARROW, H.G. ; TENENBAUM, J.M.: Recovering intrinsic scene characteristics from images. In: *Computer Vision Systems* (1978), S. 3–26

- [BW86] BRAINARD, David H. ; WANDELL, Brian A.: Analysis of the Retinex Theory of Color Vision. In: *Journal of the Optical Society of America A* 3 (1986), Nr. 10, S. 1651–1661
- [Can86] CANNY, John F.: A computational approach to edge detection. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 8 (1986), Nr. 6, S. 679–698
- [CGPP01] CUCCHIARA, R. ; GRANA, C. ; PRATI, A. ; PICCARDI, M.: Detecting Objects, Shadows and Ghosts in Video Streams by Exploiting Color and Motion Information. In: *Image Analysis and Processing, 2001. Proceedings. 11th International Conference on*, 2001, S. 360–365
- [CGPP03] CUCCHIARA, R. ; GRANA, C. ; PICCARDI, M. ; PRATI, A.: Detecting Moving Objects, Ghosts, and Shadows in Video Streams. 25 (2003), 10, Nr. 10, S. 1337–1342
- [DBBS06] DUTRE, Philip ; BALA, Kavita ; BEKAERT, Philippe ; SHIRLEY, Peter: *Advanced Global Illumination*. AK Peters Ltd, 2006
- [DCHF02] DREW, Mark S. ; CHEN, Chao ; HORDLEY, Steven D. ; FINLAYSON, Graham D.: Sensor Transforms for Invariant Image Enhancement. In: *Tenth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering Systems, Technologies, Applications*, 2002, S. 325–329
- [DHP03] DROEGE, Detlev ; HONG, Vinh ; PAULUS, Dietrich: Farbnormierung auf langen Bildfolgen. In: [Fra03], 107-112
- [Ebn07] EBNER, Marc: *Color Constancy*. Wiley & Sons, 2007
- [FCM00] FUNT, Brian ; CIUREA, Florian ; MCCANN, John: Retinex in Matlab. In: *Proceedings of IS&T/SID Eighth Color Imaging Conference*, 2000, S. 112–121
- [FDF94] FINLAYSON, G. D. ; DREW, M. S. ; FUNT, B. V.: Spectral sharpening: sensor transformations for improved color constancy. In: *Journal of the Optical Society of America A* 11 (1994), 5, S. 1553–1563

- [FDL04] FINLAYSON, Graham D. ; DREW, Mark S. ; LU, Cheng: Intrinsic Images by Entropy Minimization. In: *European Conference on Computer Vision (ECCV 2004)*. Praque, 2004, 582-595
- [FF95] FUNT, Brian V. ; FINLAYSON, Graham D.: Color Constant Color Indexing. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence* 17 (1995), 5, Nr. 5, S. 522–529
- [FF05] FREDEMBACH, Clement ; FINLAYSON, Graham D.: Hamiltonian path based shadow removal. In: *Proceedings of 16th British Machine Vision Conference (BMVC)*, 2005, S. 970–980
- [FH01] FINLAYSON, Graham D. ; HORDLEY, Steven: Color constancy at a pixel. In: *Optical Society of America Journal A* 18 (2001), 2, 253-264. http://www2.cmp.uea.ac.uk/~pm/cp_web/253.pdf
- [FHD02a] FINLAYSON, Graham D. ; HORDLEY, Steven ; DREW, Mark S.: Removing shadows from images. In: *European Conference on Computer Vision (ECCV 2002)*. Copenhagen, 2002, IV 823-836. – Lecture Notes in Computer Science Vol. 2353
- [FHD02b] FINLAYSON, Graham D. ; HORDLEY, Steven ; DREW, Mark S.: Removing Shadows From Images using Retinex. In: *Color Imaging Conference*. Scottsdale, Arizona, 11 2002, 73-79
- [FHLD06] FINLAYSON, Graham D. ; HORDLEY, Steven ; LU, Cheng ; DREW, Mark S.: On the removal of shadows from images. In: *Pattern Analysis and Machine Intelligence* 28 (2006), 1, Nr. 1. <http://www.cs.sfu.ca/~mark/ftp/Pami06/pami06.pdf>
- [FLD05] FINLAYSON, Graham D. ; LU, Cheng ; DREW, Mark S.: Invariant Image Improvement by sRGB Colour Space Sharpening. In: *AIC 2005: The Tenth Congress of the International Colour Association*. Granada, Spain, 2005
- [FM83] FRANKLE, J. ; MCCANN, J.: *Method and apparatus for lightness imaging*. 1983. – US Patent no. 4, 384,336

- [Fra03] FRANKE, Karl-Heinz (Hrsg.): *9. Workshop Farbbildverarbeitung*. Ilmenau : Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V., 2003
- [FTK04] FIGOV, Z. ; TAL, Y. ; KOPPEL, M.: Detecting and Removing Shadows. In: *International Conference on Computer Graphics and Imaging*, 2004
- [GDB⁺99] GEUSEBROEK, Jan-Mark ; DEV, Anuj ; BOOMGAARD, Rein van d. ; SMEULDERS, Arnold W. ; CORNELISSEN, Frans ; GEERTS, Hugo: Color Invariant Edge Detection. In: *Scale-Space Theories in Computer Vision: Second International Conference, Scale-Space'99, Corfu, Greece, September 1999. Proceedings* Bd. 1682/1999, Springer Berlin / Heidelberg, 1999, S. 459
- [GJT86] GERSHON, R. ; JEPSON, A. D. ; TSOTSOS, J. K.: Ambient illumination and the determination of material changes. In: *Journal of the Optical Society of America* 3 (1986), Nr. 10, S. 1700–1707
- [GS97] GEVERS, Theo ; SMEULDERS, Arnold W.: Color Based Object Recognition. In: *ICIAP '97: Proceedings of the 9th International Conference on Image Analysis and Processing-Volume I*. London, UK : Springer-Verlag, 1997, S. 319–326
- [GS03] GEVERS, Theo ; STOKMAN, Harro: Classifying color edges in video into shadow-geometry, highlight, or material transitions. In: *IEEE Transactions on Multi Media* 5 (2003), 6, Nr. 2, 237- 243. <http://staff.science.uva.nl/~gevers/pub/GeversSMM03.pdf>
- [HDP07] HANS, Wolfram (Hrsg.) ; DROEGE, Detlev (Hrsg.) ; PAULUS, Dietrich (Hrsg.): *13. Workshop Farbbildverarbeitung*. Tönning : Der Andere Verlag, 2007
- [HGF⁺06] HANS, Wolfram ; GROSCH, Thorsten ; FELDMANN, Tobias ; PAULUS, Dietrich ; MÜLLER, Stefan: Modell der Bildentstehung mit HDR-Kameras. In: *12. Workshop Farbbildverarbeitung*, 2006, 97-108

- [HHD99] HORPRASERT, Thanarat ; HARWOOD, David ; DAVIS, Larry S.: A Statistical Approach for Real-time Robust Background Subtraction and Shadow Detection. In: *Proc. IEEE ICCV FRAME-RATE Workshop*, 1999
- [Hor74] HORN, B.K.P.: Determining Lightness from an Image. In: *Computer Graphics and Image Processing* 3 (1974), Nr. 1
- [JRW97a] JOBSON, D.J. ; RAHMAN, Z. ; WOODSELL, G.A.: A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes. In: *IEEE Transactions on Image Processing* 6 (1997), Nr. 7, S. 965–976
- [JRW97b] JOBSON, D.J. ; RAHMAN, Z. ; WOODSELL, G.A.: Properties and performance of a center/surround retinex. In: *IEEE Transactions on Image Processing* Bd. 6, 1997, S. 451–462
- [JW94] JIANG, C. ; WARD, M.O.: Shadow segmentation and classification in a constrained environment. In: *CVGIP: Image Understanding* 59 (1994), Nr. 2, S. 213–225
- [Lan74] LAND, Edwin H.: The retinex theory of colour vision. In: *Proc. Royal Inst. Great Britain* Bd. 47, 1974, S. 23–58
- [Lan77] LAND, E.H.: The Retinex Theory of Color Vision. In: *Scientific American* 237 (1977), Nr. 6, S. 108–128
- [Lan83] LAND, E.H.: Recent advances in retinex theory and some implications for cortical computations: color vision and the natural image. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 80 (1983), Nr. 16, S. 5163–5169
- [Lan86a] LAND, Edwin H.: An alternative technique for the computation of the designator in the retinex theory of color vision. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 83 (1986), Nr. 10, S. 3078–3080

- [Lan86b] LAND, Edwin H.: Recent advances in retinex theory. In: *Vision Research* 26 (1986), Nr. 1, S. 7–21
- [LM71] LAND, E.H. ; MCCANN, J.J.: Lightness and Retinex Theory. In: *Journal of the Optical Society of America* 61 (1971), 1, Nr. 1, S. 1–11
- [Mal02] MALACARA, Daniel: *Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications*. SPIE–The International Society for Optical Engineering, 2002
- [McC99] MCCANN, J.: Lessons Learned from Mondrian Applied to Real Images and Color Gamuts. In: *Proceedings of the IS&T/SID Seventh Color Imaging Conference*, 1999, S. 1–8
- [MNIS04] MATSUSHITA, Yasuyuki ; NISHINO, Ko ; IKEUCHI, Katsushi ; SAKAUCHI, Masao: Illumination Normalization with Time-Dependent Intrinsic Images for Video Surveillance. In: *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 26 (2004), Nr. 10, S. 1336–1347
- [MR00] MARINI, D. ; RIZZI, A.: A computational approach to color adaptation effects. In: *Image and Vision Computing* 18 (2000), 10, Nr. 13, S. 1005–1014
- [PDCRM05] PROVENZI, E. ; DE CARLI, L. ; RIZZI, A. ; MARINI, D.: Mathematical definition and analysis of the retinex algorithm. In: *Journal of the Optical Society of America A* 22 (2005), Nr. 12, S. 2613–21
- [PMTC03] PRATI, A. ; MIKIC, I. ; TRIVEDI, M.M. ; CUCCHIARA, Rita: Detecting Moving Shadows: Algorithms and Evaluation. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 25 (2003), 7, Nr. 7, 918–923. http://imagelab.ing.unimo.it/pubblicazioni/pubblicazioni/pami_shadows.pdf
- [PN01] PINEL, J. ; NICOLAS, H.: Estimation 2d illuminant direction and shadow segmentation in natural video sequences. In: *Proceedings of VLBV*, 2001, S. 197–202

- [RSYD05] RAMANATH, Rajeev ; SNYDER, Wesley E. ; YOO, Youngjun F. ; DREW, Mark S.: Color Image Processing Pipeline in Digital Still Cameras. In: *IEEE Signal Processing , Special Issue on Color Image Processing* 22 (2005), 1, Nr. 1, S. 34–43
- [Sau88] SAUPE, Dietmar: Algorithms for random fractals. In: *The Science of Fractal Images*. New York, NY, USA : Springer-Verlag New York, Inc., 1988, S. 71–113
- [SB97] SMITH, S.M. ; BRADY, M.: SUSAN - A New Approach to Low Level Image Processing. In: *International Journal of Computer Vision* 23 (1997), Nr. 1, S. 45–78
- [SCE04] SALVADOR, Elena ; CAVALLARO, Andrea ; EBRAHIMI, Touradj: Cast shadow segmentation using invariant color features. In: *Computer Vision and Image Understanding* 95 (2004), Nr. 2, S. 238–259
- [SLW06] SOH, Young S. ; LEE, Hwanju ; WANG, Yakun: Invariant Color Model-Based Shadow Removal in Traffic Image and a New Metric for Evaluating the Performance of Shadow Removal Methods. In: *PRICAI 2006: Trends in Artificial Intelligence, 2006* (Lecture Notes in Computer Science), S. 544–552
- [SMO99] STAUDER, Jürgen ; MECH, Roland ; OSTERMANN, Jörn: Detection of Moving Cast Shadows for Object Segmentation. In: *IEEE Transactions on Multi Media* 1 (1999), 3, Nr. 1, S. 65–76
- [SPH07] STEINMETZ, Sarah ; PAULUS, Dietrich ; HANS, Wolfram: Schattenentfernung unter Verwendung des Retinex-Algorithmus. In: [HDP07], S. 93–104
- [Ste06] STEINMETZ, Sarah: *Schätzung planarer Flächen in verrauschten Tiefenbildern für den RoboCup Rescue Wettbewerb*, Universität Koblenz-Landau, Studienarbeit, 2 2006

- [TFA05] TAPPEN, Marshall F. ; FREEMAN, William T. ; ADELSON, Edward H.: Recovering Intrinsic Images from a Single Image. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 27 (2005), Nr. 9, S. 1459–1472
- [TM98] TOMASI, Carlo ; MANDUCHI, Roberto: Bilateral Filtering for Gray and Color Images. In: *Sixth International Conference on Computer Vision IEEE Computer Society*, 1998, 839-846
- [Wan95] WANDELL, Brian A.: *Foundations of Vision*. Sinauer Associates, 1995
- [Wei01] WEISS, Yair: Deriving Intrinsic Images from Image Sequences. In: *International Conference on Computer Vision (ICCV 2001)*. Vancouver, 2001, 68–75
- [WHR91] WANG, Chengye ; HUANG, Liuqing ; ROSENFELD, A.: Detecting clouds and cloud shadows on aerial photographs. In: *Pattern Recogn. Lett.* 12 (1991), Nr. 1, S. 55–64
- [WS82] WYSZECKI, Günter ; STILES, W. S.: *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulas*. second. Wiley, 1982
- [XQJ⁺06] XU, Li ; QI, Feihu ; JIANG, Renjie ; HAO, Yunfeng ; WU, Guorong: *Shadow Detection and Removal in Real Images: A Survey*. 6 2006. – unpublished