Automatische Kalibrierung von Multiprojektorsystemen

vorgelegt von
Diplom-Informatiker
Stefan Klose

von der Fakultät IV Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr. Peter Pepper
1. Gutachter:	Prof. Dr. Stefan Jähnichen
2. Gutachter:	Prof. Dr. Wolf Dieter Fellner

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 05. März 2012

Berlin 2012

D 83

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Dissertation selbstständig ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe. Alle den benutzten Quellen wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen sind als solche einzeln kenntlich gemacht.

Berlin, 08. März 2012

Unterschrift

Kurzfassung

In vielen Bereichen von Industrie, Forschung und Entwicklung, aber auch Kunst, Kultur und Lehre finden Projektionssysteme ihren Einsatz. In diesem Umfeld sind die qualitativen Ansprüche bzw. die Komplexität der Anwendungsfälle dermaßen hoch, dass herkömmliche Ein-Projektor-Systeme[1] für diese Fälle nicht mehr ausreichen. Zur Erhöhung der Helligkeit oder der Auflösung, zur Darstellung dreidimensionaler stereoskopischer Inhalte, aus Redundanzgründen oder um eine scharfgestellte Projektion auf einer dreidimensionalen Projektionsfläche zu gewährleisten, werden daher Multiprojektorsysteme eingesetzt. Die Teilprojektionen eines solchen Systems liefern dabei aber ohne Anpassungen keine gewünschte homogene Gesamtprojektion. Es treten Pixelversätze, Helligkeitsunterschiede und Abweichungen von der Geometrie der Projektionsfläche auf.

Aus diesem Grund müssen Multiprojektorsysteme pixelgenau kalibriert werden. Die Kalibrierung ist nicht trivial und erfolgt durch manuelle, semiautomatische oder automatische Verfahren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei neuartige, robuste, automatische, kamerabasierte Verfahren zur zeitsparenden und exakten Einrichtung von Multiprojektorsystemen entwickelt. Die Verfahren lösen das Problem der Kalibrierung für regelmäßig geformte zwei- und dreidimensionale sowie beliebig geformte Projektionsflächen.

Projection systems are widely used in many application areas of industry, research & development, art & culture or teaching. Single channel systems are not adequate for more complex use cases. For increasing the brightness or resolution, for displaying three-dimensional stereoscopic content, for obtaining redundancy or for guaranteeing a focused projection on a three-dimensional projection surface, multi channel systems need to be used. However without adaptations the partial projections of such a system do not form a homogenous projection. Visible artifacts due to pixel offsets, brightness differences, and deviations from the geometry of the projection surface may occur.

In order to eliminate those effects a multi channel system has to be pixel-perfectly calibrated. In most cases this calibration is a non-trivial task that can be solved with manual, semiautomatic and fully automatic algorithms.

This doctoral thesis introduces three novel, robust, automatic, camera-based algorithms for time-saving and exact calibration of multi projector systems. These three algorithms solve the mentioned problems for regular formed two- and three-dimensional as well as for arbitrarily formed projection surfaces.

[1] Auch Ein-Kanal-Systeme.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung II

Kurzfassung IV

Inhaltsverzeichnis VI

Danksagung X

1 Einleitung 1

2 Stand der Wissenschaft und Technik 7
2.1 Manuelle Verfahren 7
2.2 Semiautomatische Verfahren 8
2.3 Automatische Verfahren 9
2.3.1 Projective Texture Mapping 9
2.3.2 iLamps/Display Grid 11
2.3.3 Kalibrierung mit eingebetteten Lichtsensoren 13
2.3.4 Multi-Planar Displays 14
2.3.5 Scalable Displays 15
2.3.6 Smart Projectors 16
2.3.7 Markerlose betrachterunabhängige Multiprojektorregistrierung 17
2.3.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen 19

3 Grundlagen 25
3.1 Systemarchitektur 25
3.1.1 Hardware 25
3.1.1.1 Computercluster 26
3.1.1.2 Projektoren und Projektionsfläche 27
3.1.1.3 Digitalkamera 30
3.1.1.4 Ein-/Ausgabegeräte/optionale Erweiterungen 33
3.1.2 Software 34
3.1.2.1 AutoCalib 34
3.1.2.2 Distributed Rendering System – DRS 35
3.2 Wahrnehmungspsychologische Aspekte 36
3.2.1 Motivation – Das Gemäldegalerie-Phänomen 36
3.2.2 Wahrnehmungspsychologische Regeln 37
3.2.2.1 Verfügbarer und beachteter Stimulus 37
3.2.2.2 Gestaltprinzipien 40
3.2.2.3 Objektwahrnehmung: erfahrungsabhängige Plastizität vs. Evolution 41
3.2.3 Lokales und globales Referenzsystem / Betrachterunabhängigkeit 42
3.2.3.1 Zusammenfassung 53

4 Algorithmen 55
4.1.1 AutoCalib – Kamerabezogene 2D-Kalibrierung 57
4.1.1.1 Einleitung 57
4.1.1.2 Algorithmischer Überblick 58

4.1.1.3 Projektion und Aufnahme der Kalibrierbilder 59
4.1.1.4 Filterung der Kalibrierbilder 59
4.1.1.5 Schnittpunktbestimmung der Kalibrierbilder 60
4.1.1.6 Bestimmung der größtmöglichen rechteckigen Projektionsfläche 61
4.1.1.7 Parameter für die Bildkorrektur 61
4.1.1.8 Echtzeitanwendung 63
4.1.2 AutoCalib2D – Projektionsflächenbezogene 2D-Kalibrierung 64
4.1.2.1 Einleitung 64
4.1.2.2 Algorithmischer Überblick 66
4.1.2.3 Projektion und Aufnahme der Kalibrierbilder 66
4.1.2.4 Filterung der Kalibrierbilder 67
4.1.2.5 Ad-hoc Linsenentzerrung 68
4.1.2.6 Rand- und Eckenerkennung der Projektionsfläche 69
4.1.2.7 Homographie-Transformation 69
4.1.2.8 Schnittpunktbestimmung der Kalibrierbilder 70
4.1.2.9 Parameter für die Bildkorrektur 70
4.1.3 AutoCalib3D – Projektionsflächenbezogene 3D-Kalibrierung 71
4.1.3.1 Einleitung 71
4.1.3.2 Algorithmischer Überblick 73
4.1.3.3 Projektion und Aufnahme der Kalibrierbilder 74
4.1.3.4 Filterung der Kalibrierbilder 74
4.1.3.5 Parameterbestimmung für ad-hoc Linsenentzerrung 75
4.1.3.6 Rand- und Eckenerkennung der Projektionsfläche 75
4.1.3.7 Homographie-Transformation und Rücktransformation der korrespondierenden Randpunkte 75
4.1.3.8 3D-Rekonstruktion 78
4.1.3.9 Schnittpunktbestimmung der Kalibrierbilder 78
4.1.3.10 Parameter für die Bildkorrektur 79
4.1.4 Klassifizierung – Verknüpfung der drei Verfahren 80

5 Anwendungen 83

6 Zusammenfassung und Ausblick 95

7 Anhang: Algorithmische Details 97
7.1 AutoCalib – Kamerabezogene 2D-Kalibrierung 97
7.1.1 Projektion und Aufnahme der Kalibrierbilder 97
7.1.2 Filterung der Kalibrierbilder 102
7.1.3 Schnittpunktbestimmung der Kalibrierbilder 112
7.1.3.1 Die Homographie Transformation 116
7.1.3.2 Korrektur der radialen Linsenverzerrung 118
7.1.4 Bestimmung der größtmöglichen Projektionsfläche 124
7.1.5 Parameter für die Bildkorrektur 132
7.1.5.1 Warping-Paramter 133
7.1.5.2 Blending-Parameter 134
7.1.6 Echtzeitanwendung 150
7.2 AutoCalib2D – Projektionsflächenbezogene 2D-Kalibrierung 153

7.2.1 Projektion und Aufnahme der Kalibrierbilder 153
7.2.2 Schnittpunktbestimmung der Kalibrierbilder 158
7.3 AutoCalib3D – Projektionsflächenbezogene 3D-Kalibrierung 161
7.3.1 Projektion und Aufnahme der Kalibrierbilder 161
7.3.2 3D-Rekonstruktion 167
7.3.3 Schnittpunktbestimmung der Kalibrierbilder 172
7.3.4 Parameter für die Bildkorrektur 176

8 Quellen- und Literaturverzeichnis 179

Abbildungsverzeichnis 191

Formelverzeichnis 197

Danksagung

Bereits während meiner universitären Ausbildung interessierte ich mich für verschiedene technische Themenkomplexe. Im Rahmen meines Studiums der Informatik beschäftigte ich mich mit Computergrafik, Bildverarbeitung, Künstlicher Intelligenz und Digitaler Signalverarbeitung. Diese Interdisziplinarität setzte sich auch in meiner Forschungsarbeit am Fraunhofer Institut für Rechnerarchitektur und Softwaretechnik (FIRST) und beim Schreiben meiner Dissertation fort.

Informatiker werden in vielen Bereichen eingesetzt und sollen anderen Fachrichtungen gegenüber aufgeschlossen sein. Sie müssen in der Lage sein sich schnell in neue Themengebiete einzuarbeiten. Andere Forschungszweige können für die eigene Arbeit neue Impulse aufzeigen, wie beispielsweise die Entwicklung des mp3-Codecs am Fraunhofer IIS eindrucksvoll bewiesen hat. Im Rahmen meiner Dissertation werden daher Erkenntnisse der Computergrafik, Bildverarbeitung, Künstlichen Intelligenz, Optik, Mathematik, Physik und Wahrnehmungspsychologie behandelt.

Die hier vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung „Interaktive Systeme“ (ISY) am Fraunhofer Institut für Rechnerarchitektur und Softwaretechnik (FIRST).

Ich danke allen aktuellen und ehemaligen FIRST-Mitarbeitern, die den Entstehungsprozess der Arbeit mit großem Interesse verfolgt haben und diese durch Diskussionen und Anregungen verbessert haben. Mein Dank gilt insbesondere Dr. Michael John, Manuel Schiewe, Karsten Isaković, Silvio Peikert, Felix Dingeldey, Dr. Armin Wolf, Dr. Hans-Werner Pohl, Ivo Haulsen, Kay-Ingo Ahlers, Jérémie Gerhardt PhD., Dr. Gerd Kock, Dr. Jan Wloka, Gilbert Beyer, Holger Grahn, Benny Häusler, Konrad Campowsky sowie den Teilnehmern des FIRST-Doktoranden-Kolloquiums. Des Weiteren danke ich meinen externen „Beratern“ Dr. Denise Sommer und Dr. Christof Puhle, die ich jederzeit zu wahrnehmungspsychologischen bzw. mathematischen Inhalten befragen konnte.

Ich danke meinem Kollegen Rodger Burmeister, der mich in erster Linie zum Schreiben dieser Arbeit ermuntert hat.

Großer Dank gilt meinem Abteilungsleiter Herbert Rüsseler, der mir genügend Freiräume zur Fertigstellung der Arbeit einräumte.

Christiane Klose und Dr. Michael John danke ich für die sorgfältige Lektorierung dieser Arbeit.

Besonderer Dank gilt Prof. Dr. Stefan Jähnichen, der trotz dreifacher Belastung durch GI-Präsidentschaft, Lehrstuhl an der Technischen Universität Berlin und Leitung des Fraunhofer Instituts für Rechnerarchitektur und Softwaretechnik immer Zeit für ein persönliches Ge-

spräch fand und durch seine Anregungen zur Verbesserung der hier vorliegenden Arbeit beitrug.

Ich bedanke mich bei Prof. Dr. Dieter Fellner für die Übernahme des Zweitgutachtens und die Möglichkeit, meine Arbeit am Fraunhofer Institut für Graphische Datenverarbeitung (IGD) vorzustellen. Des Weiteren danke ich ihm für den Anstoß zur Kooperation mit seinen IGD-Kollegen Priv. Doz. Dr. habil. Arjan Kuijper und Timo Engelke – bei denen ich mich hiermit ebenso herzlich bedanke –, die zum Schreiben des GRAPP-Papers führte (Klose 2011).

Last but not least bedanke ich mich bei meiner Frau, meiner Familie und meinen Freunden, die viel Verständnis für lange Büroarbeitszeiten und Arbeiten an Wochenenden aufgebracht haben.

1 Einleitung

In vielen Bereichen von Industrie, Forschung und Entwicklung, aber auch Kunst, Kultur und Lehre finden Projektionssysteme ihren Einsatz. In diesem Umfeld sind die qualitativen Ansprüche bzw. die Komplexität der Anwendungsfälle dermaßen hoch, dass herkömmliche Ein-Kanal-Systeme für diese Fälle nicht mehr ausreichen. Diese stoßen bei komplexeren Anwendungsfällen an ihre Grenzen, sobald z. B. die Helligkeit und Auflösung erhöht werden sollen, die Projektion von 3D-stereoskopischen Inhalten oder die fokussierte Projektion auf dreidimensional verformte Projektionsflächen ermöglicht werden soll sowie Ausfallsicherheit durch Redundanz sichergestellt werden soll. Beispielhafte Szenarien sind:

- **Konferenzen**: Anforderungen an eine Konferenzprojektion sind eine hohe Leuchtstärke und hohe Ausfallsicherheit. Wenn dies ist mit einem einzelnen Projektor nicht erreichbar ist, können mehrere Projektoren benutzt werden. Fällt ein Projektor aus, verringert sich zwar die Helligkeit der Projektion, es ist aber immer noch ein Bild zu sehen. Dieses Prinzip wird als **Stacking** bezeichnet.
- **Architektur-/CAD-Design**: Im Architektur- bzw. CAD-Design müssen sehr große Modelle visualisiert werden. Zur Erhöhung der Immersion[2] werden auch teilweise 3D-Stereoprojektionen und/oder CAVE-Systeme[3] eingesetzt. Um die zu visualisierenden Objekte in ansprechender Größe und gutem Detailierungsgrad darstellen zu können, muss die Auflösung der Projektion erhöht werden. Dies ist wiederum nicht mit einem einzelnen Projektor erreichbar. Die Gesamtprojektion wird daher aus mehreren Teilprojektionen zusammengesetzt, wobei ein Projektor des Multiprojektorsystems nur einen kleinen Ausschnitt des Gesamtbildes darstellt. Die Teilprojektionen müssen horizontal und vertikal so ausgerichtet sein, dass sie ein homogenes, hochaufgelöstes Gesamtbild erzeugen. Die Teilprojektionen können sich dabei überlappen oder aneinander angrenzen. Dieses Prinzip wird als **Mosaicking** bezeichnet. Für die 3D-stereoskopische Darstellung kommt bei passiven Verfahren wiederum Stacking zum Einsatz.
- **Messen/Empfangsbereich**: Auf Messen bzw. im Empfangsbereich von Firmen werden gerne so genannte Eyecatcher aufgestellt. Dabei kann es sich um eine Skulptur, aber auch um eine nicht alltägliche Form der Projektionsfläche handeln (siehe Abb. 1-1). Diese Eyecatcher sollen beim Betrachter Interesse erzeugen. Je nach Form und Größe der Projektionsfläche erfolgt die Projektion mit einem

[2] In der virtuellen Realität: Eintauchen in eine computergenerierte Welt.

[3] CAVE: Cave Automatic Virtual Environment.

oder mehreren Projektoren. Wird lediglich ein Projektor verwendet, muss dieser an die Geometrie der Projektionsfläche angepasst werden. Beim Einsatz mehrerer Projektoren, müssen diese zueinander (Stacking, Mosaicking) und **bezüglich der Geometrie der Projektionsfläche** angepasst werden.

Um die Grenzen von Ein-Kanal-Systemen zu überwinden, werden in solchen Szenarien Multiprojektorsysteme eingesetzt. Ohne Anpassungsarbeit formen die Teilprojektionen eines solchen Systems aber keine homogene Projektion. Sichtbare Artefakte treten aufgrund von Helligkeitsunterschieden und Pixelverschiebungen der einzelnen Projektoren zueinander sowie durch Abweichungen von der Geometrie der Projektionsfläche auf (siehe Abb. 1-2 für eine 2-Kanal-Projektion). Um diese Effekte zu beseitigen, muss ein Multiprojektorsystem kalibriert werden. Dabei müssen die folgenden Probleme gelöst werden:

- Geometriekorrektur
  - pixelgenaue Anpassung an die Projektionsfläche (siehe Abb. 1-1)
  - pixelgenaue Anpassung der Projektoren zueinander (insbesondere im Überlappungsbereich mehrerer Projektoren)
- Korrektur von Projektoreigenschaften[4]
  - Helligkeitskorrektur im Überlappungsbereich mehrerer Projektoren
  - Vignettingkorrektur
  - Farbkorrektur

Die Kalibrierung wird in zwei Schritten durchgeführt:

1. **Stitching/Warping**: In diesem Schritt erfolgt die Anpassung der Teilprojektionen zueinander oder in Bezug zu einer Projektionsfläche. Da die Teilprojektionen geometrisch nicht zueinander passen, müssen sie so verzerrt werden, dass zusammengehörige Bildinhalte pixelgenau übereinanderliegen (Stacking) bzw. aneinandergrenzen (Mosaicking) (siehe Abb. 1-3).
2. **Blending**: Bei einer zusammengesetzten Projektion (Mosaicking) ist der Überlappungsbereich mehrerer Projektoren nach dem Stitching/Warping heller als der restliche Bereich der Projektion. Um ein homogenes Bild zu erzeugen, muss die Helligkeit in diesem Bereich korrigiert werden (siehe Abb. 1-4).

Diese beiden Kalibrierschritte können mit manuellen, semiautomatischen oder automatischen Verfahren durchgeführt werden.

[4] Im Rahmen dieser Arbeit wird nur auf die Helligkeitskorrektur eingegangen.

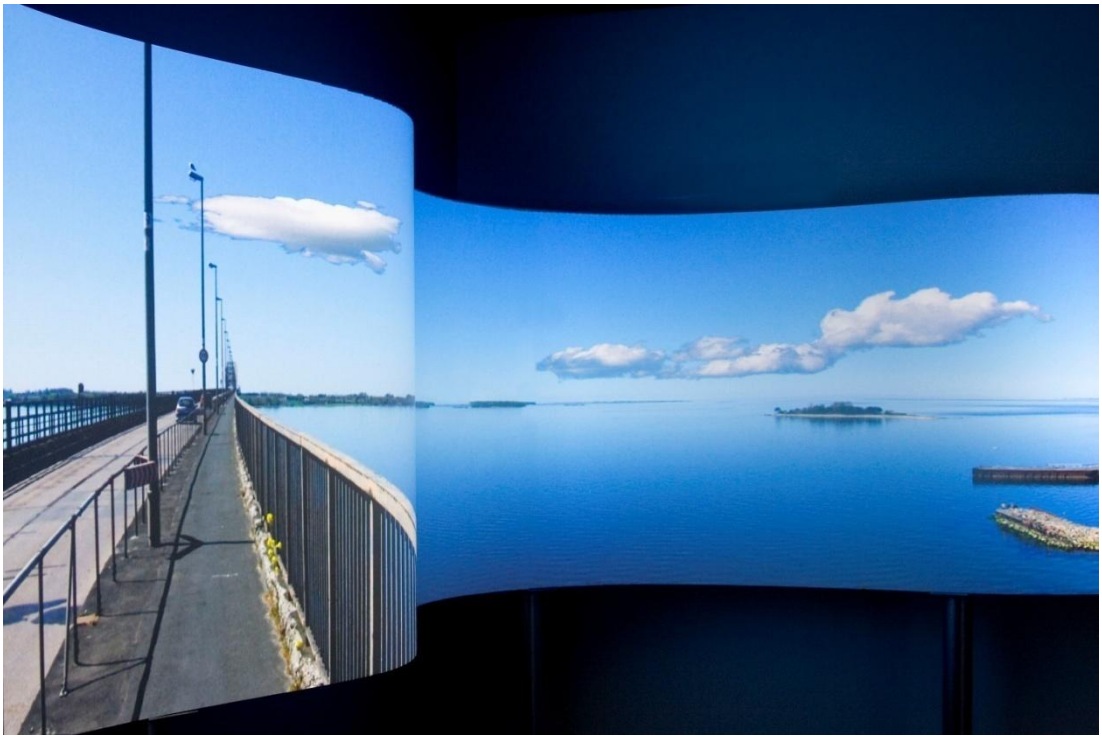

Abb. 1-1 Eyecatcher: spezielle Form einer Projektionsfläche (© Fraunhofer FIRST / Bernhard Schurian).

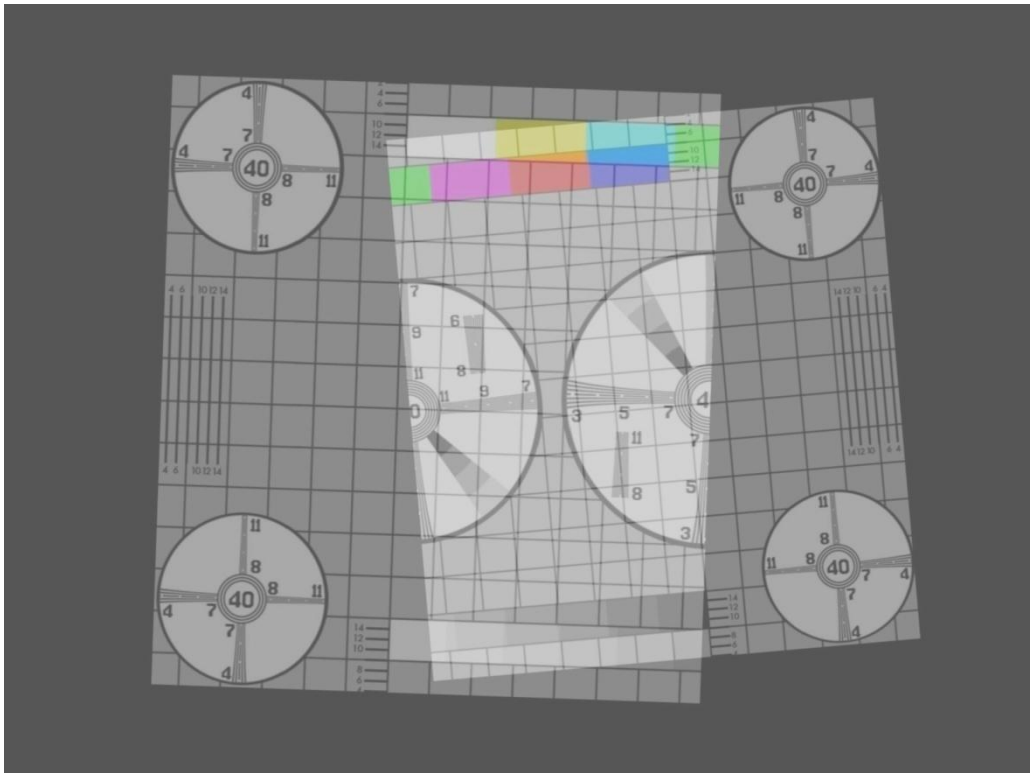

Abb. 1-2 Unkalibrierte 2-Kanal-Projektion[5].

[5] Testbild basierend auf http://www.getdtvready.com/images/test%20pattern.jpg (letzter Aufruf 07.03.2011).

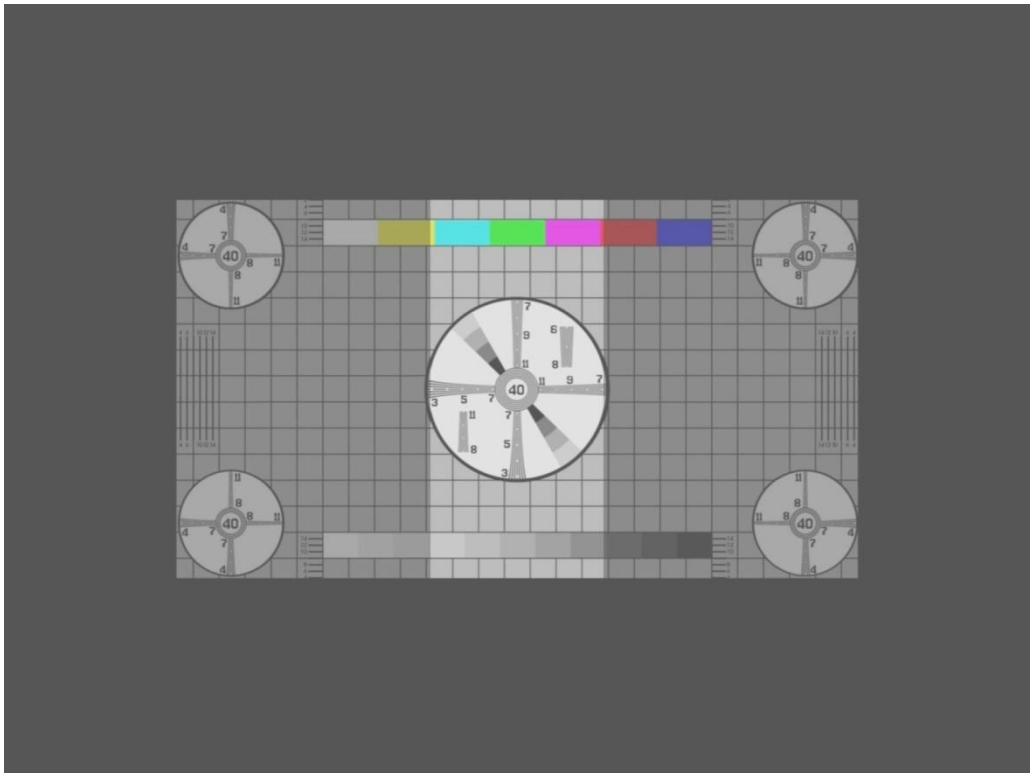

Abb. 1-3 2-Kanal-Projektion nach Stitching/Warping.

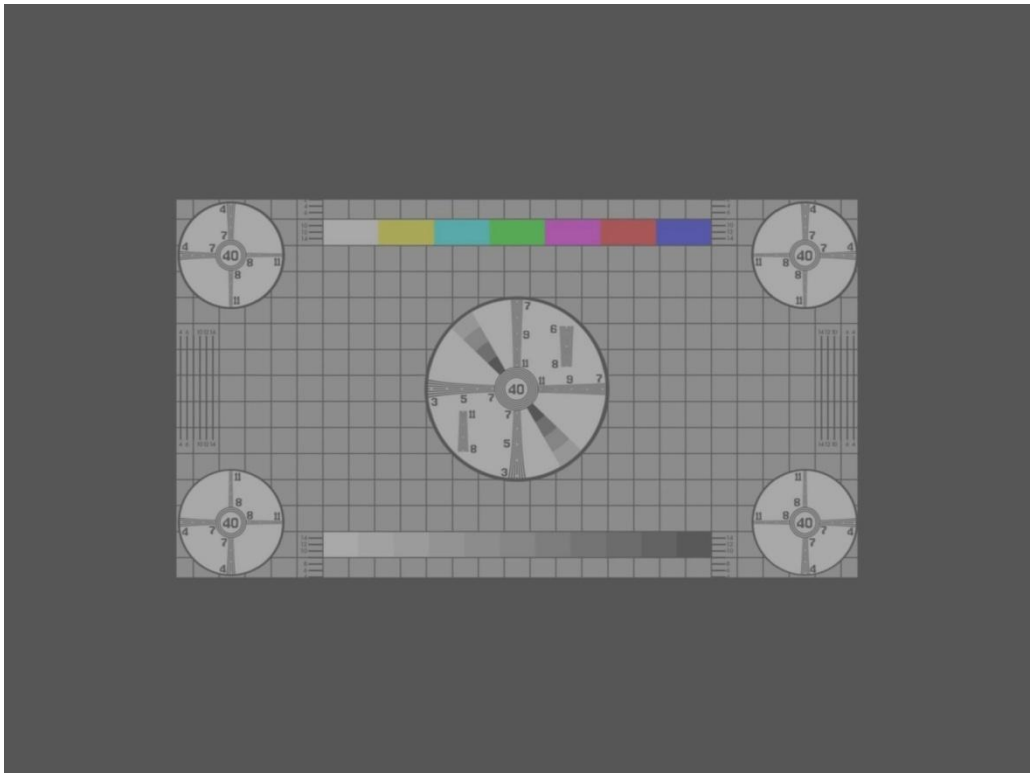

Abb. 1-4 2-Kanal-Projektion nach Stitching/Warping und Blending.

Das Ziel dieser Arbeit war es, robuste automatische kamerabasierte Verfahren zur zeitsparenden und exakten Einrichtung von Multiprojektorsystemen zu entwickeln und dabei auch wahrnehmungspsychologische Phänomene zu berücksichtigen. Die Grundlagen für die hier vorgestellten Algorithmen wurden im Rahmen des BMBF-Projekts LaserCAVE gelegt (Biehling 2004). Nach Projektende wurden die Algorithmen weiterentwickelt und teilweise patentiert (Klose 2004a; 2004b; 2005; 2007; 2009a; 2009b; 2010; 2011; Schiewe 2007; Beyer 2009; 2011; Gerhardt 2010a; 2010b).

Die Entwicklung von drei automatischen Verfahren zur Kalibrierung von Multiprojektorsystemen stand im Fokus dieser Arbeit. Trotz der Verwendung unkalibrierter Komponenten[6] kann bei den entwickelten Verfahren auf eine aufwändige Systemkalibrierung verzichtet werden. Es kommen weder idealisierende Modelle (mathematische Modelle, Drahtgittermodelle) noch exakte Ortsangaben (Position, Ausrichtung) der Projektoren und der Kamera zum Einsatz (siehe auch Kapitel 2). Eine fehleranfällige Einmessung der verwendeten Komponenten entfällt daher. Des Weiteren kann auf eine aufwändige Modifizierung der Projektionsfläche mittels Markern bzw. eine Fehlerkorrektur in einem zweiten Kalibrierschritt verzichtet werden. Bei den entwickelten Verfahren wird eine pixelgenaue Kalibrierung erreicht, da die Kalibrierung immer anhand der unmodifizierten Kamerabilder[7] erfolgt. Fehlerbehaftete, für die Kalibrierung relevante, Transformationsschritte zwischen Kamera-, Projektor- und Projektionsflächenraum entfallen.

Bei der Entwicklung der Verfahren wurden potenzielle praktische Anwendungsfälle sowie deren Wirkung auf den Betrachter berücksichtigt. Da sich die Interpretation visueller Reize im menschlichen Cortex[8] von der „Wahrnehmung“ einer Kamera unterscheidet, wurden daher wahrnehmungspsychologische Phänomene analysiert und beachtet. Damit war es möglich, betrachterunabhängige Verfahren zu entwickeln, bei denen die kalibrierten Mehrkanalprojektionen unabhängig von der Position des Betrachters korrekt wirken.

Die vorliegende Arbeit ist in sieben Kapitel unterteilt. Nach der Einleitung (Kapitel 1) wird der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik beschrieben, Nachteile der vorgestellten Algorithmen werden aufgezeigt und daraus werden wiederum die Konsequenzen für die Entwicklung der im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellten Algorithmen aufgezeigt (Kapitel 2). Im Kapitel 3 werden die Grundlagen der Verfahren erläutert. Darin werden neben der Vorstellung der verwendeten Hardware- und Softwarekomponenten auch wahrnehmungspsychologische Überlegungen vorgestellt. Kapitel 4 sowie der dazugehörige Anhang (Kapitel 7) – die

[6] Unkalibrierte Komponenten beinhalten noch die typischerweise auftretenden Verzerrungen (Projektoren: Trapezverzerrung, Kameras: radiale Verzerrung).

[7] Abgesehen von der Korrektur der radialen Verzerrung.

[8] Teil des menschlichen Großhirns, der für wichtige Funktionen, wie Sensorik und Motorik, zuständig ist.

Kernstücke dieser Arbeit – befassen sich mit den drei entwickelten Verfahren zur automatischen Kalibrierung von Multiprojektorsystemen. Die kamerabezogene 2D-Kalibrierung (AutoCalib) sowie projektionsflächenbezogene 2D- und 3D-Kalibrierung (AutoCalib2D, AutoCalib3D) werden hergeleitet und beschrieben. Im Anschluss werden Einsatzgebiete und Anwendungsbeispiele der vorgestellten Algorithmen aufgezeigt (Kapitel 5). Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick (Kapitel 6).

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf automatischen Verfahren zur Kalibrierung von Multiprojektorsystemen. Der Vollständigkeit halber, aber auch weil die Verfahren teilweise nicht scharf voneinander abgetrennt werden können, wird ein kurzer Abriss über manuelle und semiautomatische Verfahren gegeben. Anschließend folgt eine Analyse über den Stand automatischer Verfahren.

2.1 Manuelle Verfahren

Bei diesen Verfahren zur Installation von Multiprojektorsystemen erfolgt die Kalibrierung des Projektionssystems manuell durch den Nutzer. Ein Beispiel dafür ist die Korrektur der Trapezverzerrung[9], die per Fernbedienung oder am Tastenfeld des Projektors durchgeführt werden kann.

Die Einstellungen können dabei entweder

- direkt am Projektor oder per Fernbedienung bzw.
- indirekt über eine externe Software- bzw.
- externe Hardwarelösung

erfolgen.

Typische Einstellungsmöglichkeiten eines Projektors sind Zoom, Keystonekorrektur oder Lens-Shift.

Gängige Software-/Hardwarelösungen zum Imagewarping[10] und Softedge-Blending[11] sind die Systeme

- Dataton Watchout (Dataton),
- Barco ScreenSHAPER (Barco),
- NEC 3D Reform (NEC) oder
- Pandora's Box (Coolux 2008).

[9] Keystonekorrektur.

[10] In diesem Fall: Bildverzerrung durch Verschiebung von Stützstellen eines 2D- oder 3D-Meshes.

[11] Zur Erreichung einer homogenen Projektion werden überlappende Projektionsbereiche mit Hilfe einer Gammakurve oder Look-up-Table (LUT) sanft ausgeblendet.

Die größten Nachteile dieser Verfahren sind

- Ihre hohe Ungenauigkeit (besonders bei ungeschultem Personal),
- sowie der hohe Zeitaufwand zur Einrichtung.

2.2 Semiautomatische Verfahren

Bei semiautomatischen Verfahren zur Kalibrierung von Multiprojektorsystemen werden Teilaufgaben der Kalibrierung automatisch durchgeführt. Dabei müssen Parameter, die für diese Berechnung notwendig sind, vom Nutzer bereitgestellt werden. Ein Beispiel dafür ist die Kalibrierung anhand bestimmter Referenzpunkte, bei denen der Nutzer virtuelle Marker mit physikalischen Markern auf der Projektionsfläche in Übereinstimmung bringt[12]. Die Entzerrungsparameter für die restliche Projektion werden anhand dieser manuell kalibrierten Kontrollpunkte und eines Referenzmodells berechnet.

Eine andere Möglichkeit ist die Vorberechnung der Verzerrung anhand bekannter Projektorpositionen und eines vorliegenden 3D-Modells der Projektionsfläche.

Semiautomatische Verfahren wurden von

- UNC (Raskar 2000),
- IBM (Pinhanez 2001),
- Fraunhofer FIRST (Haulsen 2007; 2008) und
- 3D Perception (3DPercept 2010a)

entwickelt.
Die Nachteile dieser Verfahren sind:

- der hohe Vorverarbeitungsaufwand (3D-Modell, Definition der Kontrollpunkte),
- die Qualität der Kalibrierung, die von der Anzahl der Referenzpunkte und der Übereinstimmungstreue von Modell und Wirklichkeit abhängt und
- die Notwendigkeit der Nachjustage falls sich Modell und Wirklichkeit unterscheiden.

[12] z. B. durch manuelles Verschieben per Tastatur oder per Mausklick.

2.3 Automatische Verfahren

Bei automatischen Verfahren zur Einrichtung von Multiprojektorsystemen erfolgt die Kalibrierung des Projektionssystems ohne direkten Benutzereingriff.

Bei einigen dieser Verfahren ist kein Vorwissen über die verwendeten Projektoren, Kameras und Projektionsflächen erforderlich, bei anderen Verfahren müssen die Projektoren- und Kamerapositionen oder ein 3D-Modell der Projektionsfläche verfügbar sein. Die Grenze zu semiautomatischen Verfahren ist daher fließend.

Bei allen automatischen Verfahren werden mehrere Kalibriermuster projiziert, die mit Hilfe einer oder mehrerer Digitalkamera(s) oder anderer Sensoren erfasst und ausgewertet werden. Aus den Kalibriermustern werden die Entzerrungsparameter für jeden einzelnen Projektor berechnet und die Bilder entsprechend korrigiert. Einfache Verfahren berechnen dazu eine globale Transformationsmatrix; anspruchsvollere Verfahren berechnen die Entzerrungswerte pro Pixel. Letztere können damit auch Ungenauigkeiten einer scheinbar perfekten Projektionsfläche – wie z. B. die auf den ersten Blick nicht sichtbaren Wellen in einer Bürowand – korrigieren.

Die Entzerrung erfolgt

- bezüglich der Kamera,
- bezüglich der Projektionsfläche oder
- bezüglich einer Benutzerposition (getrackt oder bekannt).

Im Folgenden werden Verfahren zur automatischen Kalibrierung von Multiprojektorsystemen vorgestellt und analysiert und daraus Schlussfolgerungen für die Entwicklung neuer Algorithmen gezogen.

2.3.1 Projective Texture Mapping

Vom Department of Computer Science der University of North Carolina at Chapel Hill wurde ein Verfahren zur automatischen Kalibrierung von Multiprojektorsystem vorgestellt, das auf einer 3D-Rekonstruktion der Projektionsfläche basiert (Raskar 2002).

Die unparametrisierte[13] Projektionsfläche kann unregelmäßig geformt sein. Das Gesamtbild soll von mehreren Projektoren erzeugt werden. Jedem Projektor wird ein Stereo-Kamerapaar zugeordnet, mit dem die Rekonstruktion der 3D-Geometrie der Projektionsfläche berechnet wird.

[13] Die Projektionsfläche wird nicht durch eine Formel beschrieben, kann also beliebig geformt sein.

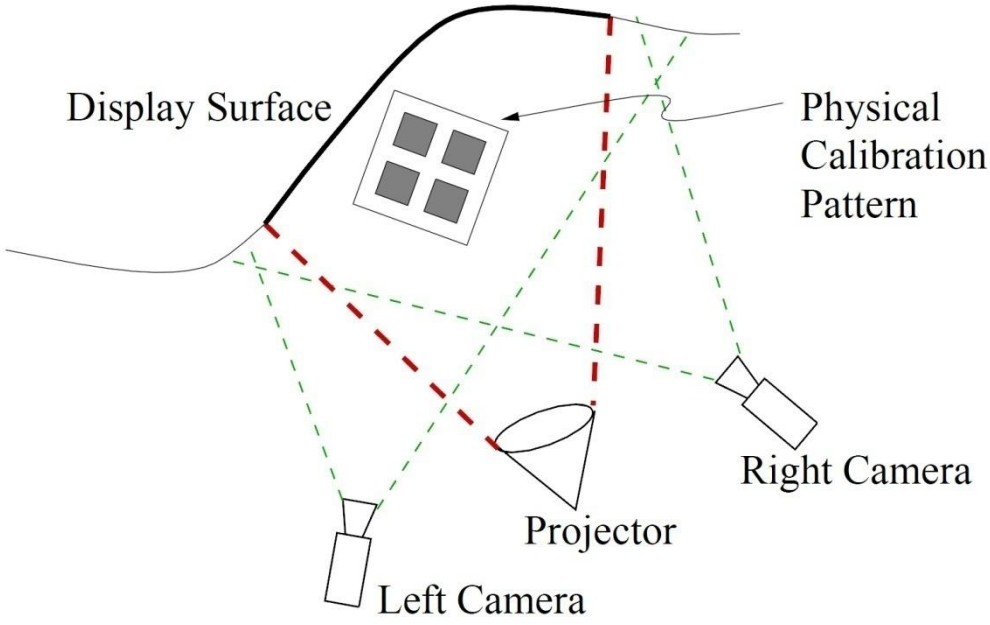

Abb. 2-1 Kalibrier-Set-up aus (Raskar 2002).

Im ersten Schritt werden die Kameras kalibriert. Dazu wird ein physikalischer Kalibrierkörper im Sichtfeld der Kameras aufgestellt. Auf diesem Kalibrierkörper befinden sich an fest definierten Positionen Kalibriermarker. Durch Extraktion der 2D-Position dieser Marker im Kamerabild, die mit einer 3D-Position auf dem Kalibrierkörper korrespondieren, wird eine 3 × 4 perspektivische Projektionsmatrix für jede Kamera bestimmt (siehe Abb. 2-1).

Im zweiten Schritt wird die 3D-Geometrie der Displayfläche mit Hilfe eines Triangulierungsverfahrens geschätzt. Dies geschieht mit den bereits kalibrierten Kameras und basiert auf den Korrespondenzen zwischen Feature-Punkten im Stereo-Kamerapaar. Bei den projizierten Feature-Punkten handelt es sich um strukturiertes Licht[14]. Die so erzeugte 3D-Punktwolke wird anschließend in jeweils ein 3D-Drahtgittermodell pro Projektor überführt[15].

Jeder Projektorpixel korrespondiert mit einem 3D-Punkt auf der Projektionsfläche. Somit kann – analog zur Kamerakalibrierung – eine Projektionsmatrix für jeden Projektor erzeugt werden. Diese Projektionsmatrix wird beim späteren Rendering Prozess verwendet.

Die Darstellung von Bildern erfolgt in einem zweistufigen Verfahren. Im ersten Schritt wird das gewünschte Bild in einer Texture Map abgelegt. Im zweiten Schritt wird diese Texture

[14] In der 3D-Rekonstruktion werden die zur Erkennung eines dreidimensionalen Objekts notwendigen Kalibriermuster als strukturiertes Licht bezeichnet. Es handelt sich dabei um ein bekanntes, eindeutig identifizierbares Muster, das aus Streifen, Punkten, Balken oder Symbolen bestehen kann.

[15] Mit Hilfe der 2D-Delaunay-Triangulierung.

Map aus Nutzersicht[16] auf das Drahtgittermodell der Projektionsfläche gerendert. Dieses texturierte Modell wird nun aus Sicht des Projektors dargestellt. In Bereichen, die von mehreren Projektoren beleuchtet werden und die somit heller als die übrige Projektionsfläche sind, erfolgt ein Intensitätsblending. Dabei werden die Überlappungsbereiche mit Hilfe einer linearen Funktion sanft ausgeblendet, so dass die Gesamtintensität im Überlappungsbereich der Intensität in den nicht überlappenden Bereichen entspricht.

Aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Kamerakalibrierung und der Geometrierekonstruktion, die wie erwähnt pro Projektor erfolgt, treten Fehler in der projizierten Darstellung auf, die im schlimmsten Fall zu Diskontinuitäten in der Gesamtprojektion führen können. Aus diesem Grund werden die separat erzeugten 3D-Teilflächen gewichtet zu einer Gesamt-3D-Fläche vereinigt. Verbleibende Fehler werden in einem anschließenden Image Warping Schritt korrigiert[17]. Dies kann allerdings zu unschönen „Welleneffekten“[18] führen, da dieser Warping Schritt nur lokal auf die Überlappungsbereiche angewendet wird (siehe auch Abb. 2-7).

2.3.2 iLamps/Display Grid

Ramesh Raskar von den Mitsubishi Electric Research Laboratories (MERL) beschäftigt sich seit Jahren mit Verfahren zur automatischen Kalibrierung von Multiprojektorsystemen. Einen besonders interessanten Ansatz sind die von ihm und seinem Team entwickelten iLamps (Raskar 2006) und Display Grids (Raskar 2004).

Das System besteht aus mehreren autonomen Projektoren (siehe Abb. 2-2), mit denen ad-hoc-Cluster gebildet werden können. Projektoren können dynamisch im Cluster an- bzw. abgemeldet werden. Mit Hilfe der in den Projektoren integrierten Module (Kamera, Neigungssensor, drahtloses Kommunikationsmodul, Computer) wird neben der Erkennung der Topologie des Projektornetzes über die geometrische Nachbarschaft auch eine automatische Geometriekorrektur inklusive Blending durchgeführt.

Mit einer im Projektor eingebauten kalibrierten Kamera wird die 3D-Tiefe der Projektionsfläche an bestimmten Kalibriermarkern mit einem Triangulationsverfahren bestimmt. Dabei werden nicht nur die Projektion des zur Kamera gehörigen Projektors betrachtet, sondern auch die angrenzenden Projektionen. Unter der Annahme, dass die Projektionsfläche eine vertikale Ebene bzw. ein vertikaler Quadrik[19] ist, kann mit Hilfe des integrierten Neigungssensors die Abweichung zur Welt-Horizontale und Welt-Vertikale bestimmt werden. Triangulationsdaten und Neigungswerte werden zur Berechnung von Homographiematrizen ver-

[16] Die Nutzerposition wird bei diesem Verfahren mit einem Infrarot-Tracker bestimmt.

[17] 2D-Postrender-Warp.

[18] Besonders bei regelmäßig geformten Projektionsflächen wie z. B. Zylindersegmenten.

[19] Z. B. Kuppel, Zylinder, Ellipsoid oder Paraboloid.

wendet, mit denen die Verzerrungen der Projektionen unter Berücksichtigung ihrer Nachbarschaft und der gewünschten Parallelität zur Welt-Horizontale und -Vertikale korrigiert werden.

Mit diesem Verfahren können nahtlose Projektionen mit sehr großen Bildseitenverhältnissen erzeugt werden, da jeder Projektor über eine eigene Kamera verfügt. Allerdings müssen sich die Projektionen bzw. die Kamerabilder überlappen, da ansonsten eine Nachbarschaft nicht erkannt werden kann.

Zur Bestimmung der 3D-Projektionsflächenkoordinaten muss das Kamera-Projektor-System sehr genau kalibriert sein. Ist das nicht der Fall, weisen die erkannten 3D-Punkte große Fehler auf. Aufgrund der Benutzung von Homographiematrizen funktioniert das Verfahren derzeit nur für perfekte Ebenen und Quadriken, die in der Realität selten anzutreffen sind[20]. Des Weiteren ist der Kalibrieraufwand (für die Bestimmung der Homographie) für Quadriken wesentlich höher als für eine Ebene.

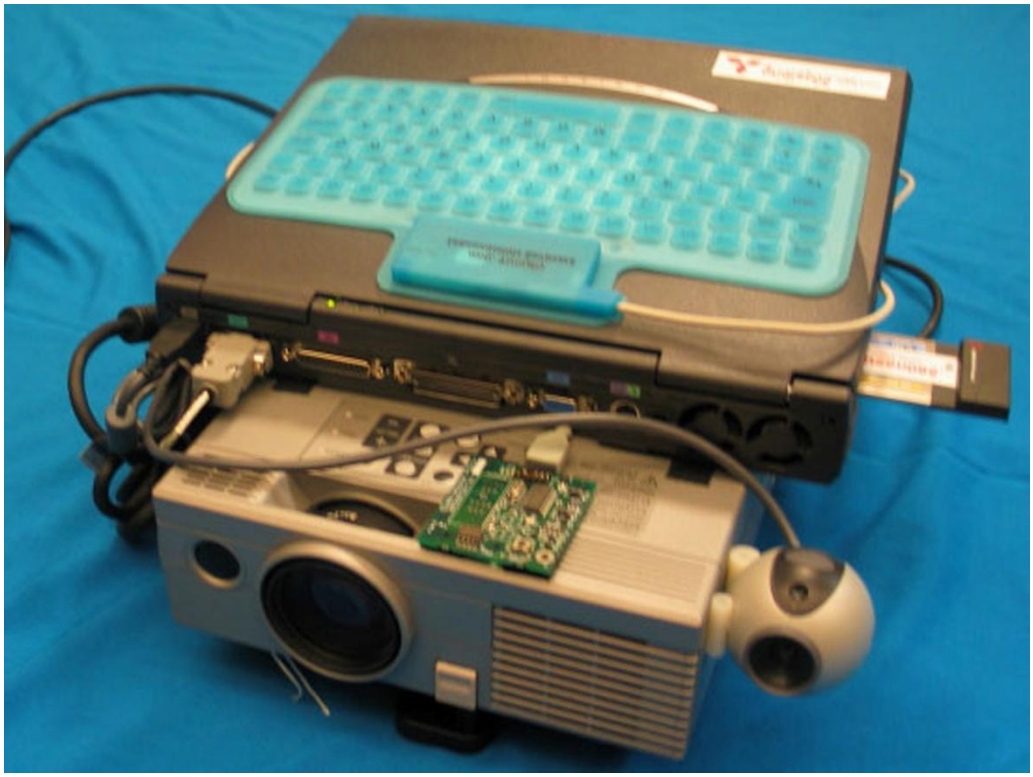

Abb. 2-2 Autonomer Projektor aus (Raskar 2006).

[20] Ein alternatives Verfahren zur Kalibrierung unter Verwendung von parametrischen Modellen wird von Webb (2007) beschrieben.

2.3.3 Kalibrierung mit eingebetteten Lichtsensoren

Vom Human-Computer Interaction Institute der Carnegie Mellon University, den Mitsubishi Electric Research Laboratories (MERL) und der School of Computer Science der Stanford University wurde ein automatisches Kalibrierverfahren entwickelt, bei dem die Projektion bezüglich einer Referenzprojektionsfläche erfolgt (Lee 2004) (siehe Abb. 2-3).

Im Gegensatz zu den meisten automatischen Verfahren wird von Lee (2004) keine „beobachtende“ Digitalkamera verwendet, sondern Lichtsensoren in den Ecken (oder anderen Feature-Punkten) der Projektionsfläche angebracht[21]. Aufgrund der geringen Anzahl verwendeter Lichtsensoren kann keine per-Pixel-Kalibrierung erfolgen. Um die geometrische Korrespondenz zwischen Projektor und Projektionsfläche zu bestimmen und die Projektion an die physikalischen Features der Projektionsfläche anzupassen, wird eine Rechteck-zu-Rechteck-Transformation[22] berechnet. Dazu muss die Position der Lichtsensoren im projizierten Bild ermittelt werden und ein sich iterativ verfeinerndes Binärmuster projiziert werden, das die Position eines Lichtsensors in jedem Iterationsschritt weiter annähert. Mit Hilfe der aus den erkannten Sensorpositionen bestimmten Homographiematrix wird das Projektorbild in Echtzeit an die Projektionsfläche angepasst.

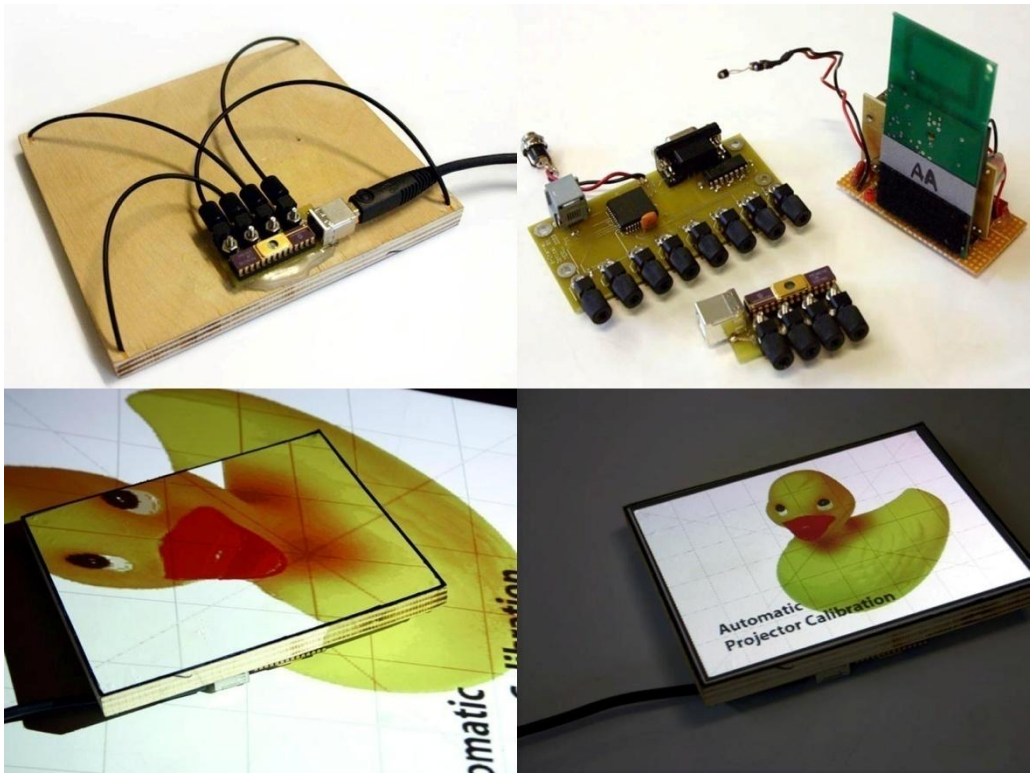

Abb. 2-3 System nach Lee (2004); obere Reihe: Sensoransteuerung mit Kabelverbindung (links), drahtlose Sensoransteuerung (rechts); untere Reihe: unkalibrierte Projektion (links), kalibrierte Projektion (rechts).

[21] Eingebettete Sensoren werden auch von 3D Perception verwendet (3DPercept 2010b).

[22] Homographiematrix.

Entscheidender Nachteil dieses Verfahrens ist, dass mit einer Homographiematrix lediglich eine globale Transformation erfolgen kann. Weist die Projektionsfläche lokale Fehler wie Unebenheiten oder Krümmungen auf, so können diese – insbesondere bei Multiprojektorsystemen[23] – nicht mehr zufriedenstellend korrigiert werden. Es wird also immer eine perfekte Projektionsfläche benötigt.

2.3.4 Multi-Planar Displays

Mark Ashdown (University of Cambridge Computer Lab), Matthew Flagg (College of Computing; Georgia Institute of Technology), Rahul Sukthankar (Intel Research Pittsburgh / The Robotics Institute; Carnegie Mellon University) und James M. Rehg (The Robotics Institute; Carnegie Mellon University) haben in (Ashdown 2004) ein weiteres System zur kamerabasierten Kalibrierung vorgestellt (siehe Abb. 2-4).

Dieses System besteht aus einer Projektionsfläche mit mehreren planaren Teilflächen und einem unkalibrierten Kamera-Projektor-Paar. Dabei könnte es sich in einem einfachen Fall um einen Schreibtisch handeln, der an eine Wand geschoben wird. Diese Art von Display kann beispielsweise in der Architektur (Tisch: Draufsicht; Wand: Höhenprofil) oder in CAVE-Systemen eingesetzt werden. Aufgrund der Ausrichtung an planaren Teilsegmenten ist das System betrachterunabhängig und somit auch für den Multiuser-Einsatz geeignet.

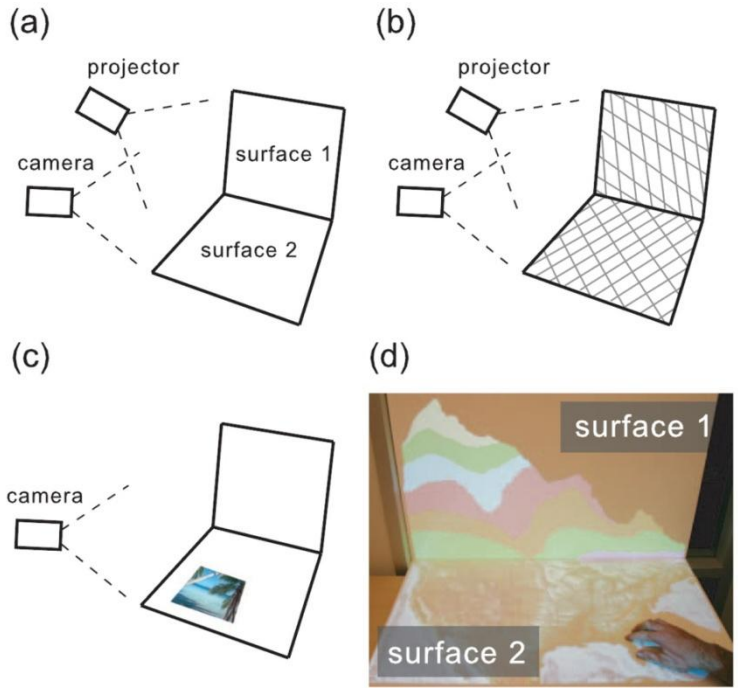

Abb. 2-4 Kalibrierung eines Multi-Planar Displays nach Ashdown (2004).

[23] Auch bei Monoprojektorsystemen können diese Fehler nicht korrigiert werden; allerdings fallen sie bei einer derartigen Projektion weniger auf.

Im Gegensatz zu Verfahren, bei denen pro Projektor eine Homographie bestimmt wird, wird bei diesem Verfahren ein Homographie-Graph berechnet (Homographie pro Teilsegment).

Bei der Kalibrierung werden vertikale und horizontale Linien projiziert. Über Diskontinuitäten in den fotografierten Linien werden die Teilsegmente des Displays identifiziert. Für jedes erkannte Teilsegment wird unabhängig voneinander eine Homographie zur Geometriekorrektur bestimmt (Projektor-Kamera-Homographie). Da das System betrachterunabhängig arbeiten soll, reicht diese Homographie nicht aus. Mit einer Projektor-Kamera-Homographie wird die korrekte Lösung lediglich für einen Betrachter an der Kameraposition erzielt.

Daher erfolgt in einem zweiten Schritt für jedes Teilsegment eine metrische Verbesserung und Anpassung zur Bestimmung einer Kamera-Oberflächen-Homographie. Dazu werden rechtwinklige Objekte[24] durch den Benutzer auf die Teilsegmente der Projektionsfläche platziert und mit Hilfe der Kamera erkannt. Unter der Annahme, dass es sich um rechtwinklige Objekte handelt[25], können dann die Homographien verfeinert werden.

In einem letzten Schritt werden die Homographien so weiter verfeinert, dass angrenzende Flächen in sich konsistent sind (Projektor-Oberfläche-Homographie). Dies ist der Fall, wenn eine Linie, die eine Segmentgrenze kreuzt, keinen sichtbaren Spalt an der Segmentgrenze aufweist. Aufgrund von Rundungsfehlern im zweiten Schritt ist dieser Spalt sichtbar, da die Segmente unabhängige Homographien benutzen. Jeder Punkt auf der Segmentgrenze wird durch zwei Projektorpunkte definiert, die im Idealfall identisch sind. Sind diese beiden Punkte nicht identisch (bzw. der Fehler größer als ein vorgegebener Schwellenwert), werden Mittelwerte der korrespondierenden Punkte gebildet und neue Homographien bestimmt. Der anfänglich auftretende Fehler wird in etwa 20 Iterationsschritten soweit minimiert, dass er nicht mehr sichtbar ist.

Das Verfahren erreicht gute, benutzerunabhängige Ergebnisse – allerdings nur unter Mithilfe eines Benutzers. Aufgrund der Verwendung von Homographien funktioniert es allerdings nur für perfekt planare Wände. Des Weiteren wird mit dem vorgestellten Algorithmus nur ein Projektor (der aber über mehrere Displayflächen strahlt) unterstützt.

2.3.5 Scalable Displays

Rajeev Surati vom Massachusetts Institute of Technology (MIT) entwickelte im Rahmen seiner Doktorarbeit (Surati 1999) eine skalierbare Lösung zur automatischen Kalibrierung von großen überlappenden Displays (Surati 2000). Die von ihm gegründete Firma Scalable Display Technologies vertreibt diese Kalibrierlösung (SDT 2006).

Bei diesem Verfahren werden zur Registrierung kleine Vierecke projiziert, von denen im

[24] Im Rahmen der Experimente wurden handelsübliche Postkarten benutzt.

[25] Es können auch andersartige (z. B. runde) Objekte verwendet werden, was die Berechnung aber verkompliziert.

Rahmen der Bildfilterung der Flächenschwerpunkt bestimmt wird. Aufgrund der Berechnung des Schwerpunktes mehrerer Pixel ist selbst mit einer Kamera, die über eine geringere Auflösung als die Projektion verfügt, eine Subpixelregistrierung möglich. Diese weist laut Surati (1999) einen maximalen Fehler von einem Pixel auf.

Das Verfahren ist mittlerweile laut Scalable Display Technologies in der Lage, die Projektion an die Form der Projektionsfläche anzupassen. Dazu wird zuerst die Abbildung zwischen Kamera und Projektionsfläche mit Hilfe präzise angebrachter Referenzpunkte bestimmt[26]. Anschließend wird über die projizierten Muster die Abbildung zwischen Kamera und Projektoren bestimmt, woraufhin das Image-Warping durchgeführt werden kann. Hierbei handelt es sich um ein per-Pixel-Warping, wobei jeder Pixel durch vier Eckpunkte repräsentiert wird, um Löcher im projizierten Bild zu vermeiden.

Die Lösung weist eine gute Kalibrierung bzgl. der Projektionsfläche auf – allerdings nur unter der Voraussetzung, dass die Kamera mit Referenzmarkern eingemessen wurde.

2.3.6 Smart Projectors

Von der Bauhaus-Universität Weimar wurde die Smart-Projector-Technologie (Bimber 2005) entwickelt, die mittlerweile von der Firma Vioso unter dem Namen „Vioso Presenter“ (Vioso 2010) vertrieben wird. Vioso hat sich vor allem auf „Extremfall“-Projektionen wie stark strukturierte Wände, Tapeten, Vorhänge oder Felsen spezialisiert (siehe Abb. 2-5).

Das System ist in der Lage, geometrische und farbliche Verzerrungen auszugleichen. Dazu wird strukturiertes Licht projiziert, das mit einer Digitalkamera aufgenommen wird. Handelt es sich um eine nichtideale Projektionsfläche oder sind die Projektoren ungünstig aufgestellt, treten im Kamerabild Verzerrungen auf. Da bei diesem Verfahren davon ausgegangen wird, dass die Benutzerposition der Kameraposition entspricht, ist anzunehmen, dass sämtliche Verzerrungen im Kamerabild auch für den Benutzer sichtbar und somit zu korrigieren sind. Aufgrund des zuvor projizierten strukturierten Lichts ist die Position eines jeden Pixels auf der Projektionsfläche bekannt und kann in einer LUT[27] abgelegt werden. Des Weiteren ist die gewünschte unverzerrte Projektion bezüglich des Kamerabildes bekannt (rechteckige Projektion im Content-Bildverhältnis, parallel zum Kamerabild, innerhalb der verzerrten Projektion). Somit kann für jeden zu projizierenden Pixel ein Verschiebungsvektor berechnet und in einer Warping-LUT abgelegt werden[28]. Die Entzerrung der projizierten Inhalte erfolgt in Echtzeit mit Pixelshadern[29].

[26] Siehe auch (Yang 2001) und (Majumder 2007).

[27] LUT = look-up-table, Datenstruktur, die vorberechnete Werte enthält.

[28] Ein ähnliches Verfahren wird auch von Majumber (2007) vorgestellt.

[29] Pixel- oder Fragmentshader sind auf der 3D-Grafikkarte laufende Programme. Aufgrund der hardwarenahen Implementierung sind diese sehr performant.

Abb. 2-5 Geometrie- und Farbkorrektur nach Bimber (2005) (Content: „Der Schakal", Universal Pictures).

Wie bereits erwähnt, erfolgt die Entzerrung aus Kamerasicht. Aus diesem Grund muss sich die Kamera idealerweise an der Nutzerposition befinden. Ist dies nicht möglich, weist auch eine kalibrierte Projektion Verzerrungen auf. Eine automatische Anpassung an die Form der Projektionsfläche erfolgt durch Clipping der Projektion, aber nicht unter Berücksichtigung einer möglicherweise auftretenden perspektivischen Verzerrung.

2.3.7 Markerlose betrachterunabhängige Multiprojektorregistrierung

An der University of California Irvine wurde von Behzad Sajadi und Aditi Majumder ein Verfahren zur markerlosen, betrachterunabhängigen, kamerabasierten Registrierung von mehreren verzerrten Projektionen auf extrudierten Projektionsflächen entwickelt (Sajadi 2009).

Das Verfahren funktioniert für Projektionsflächen, bei denen eine 2D-Kurve[30] (Profilkurve) vertikal extrudiert wird und das Bildseitenverhältnis des Rechteckes, das durch die vier Eckpunkte der Projektionsfläche entsteht, bekannt ist (siehe Abb. 2-6).

[30] Profilkurve der Projektionsfläche.

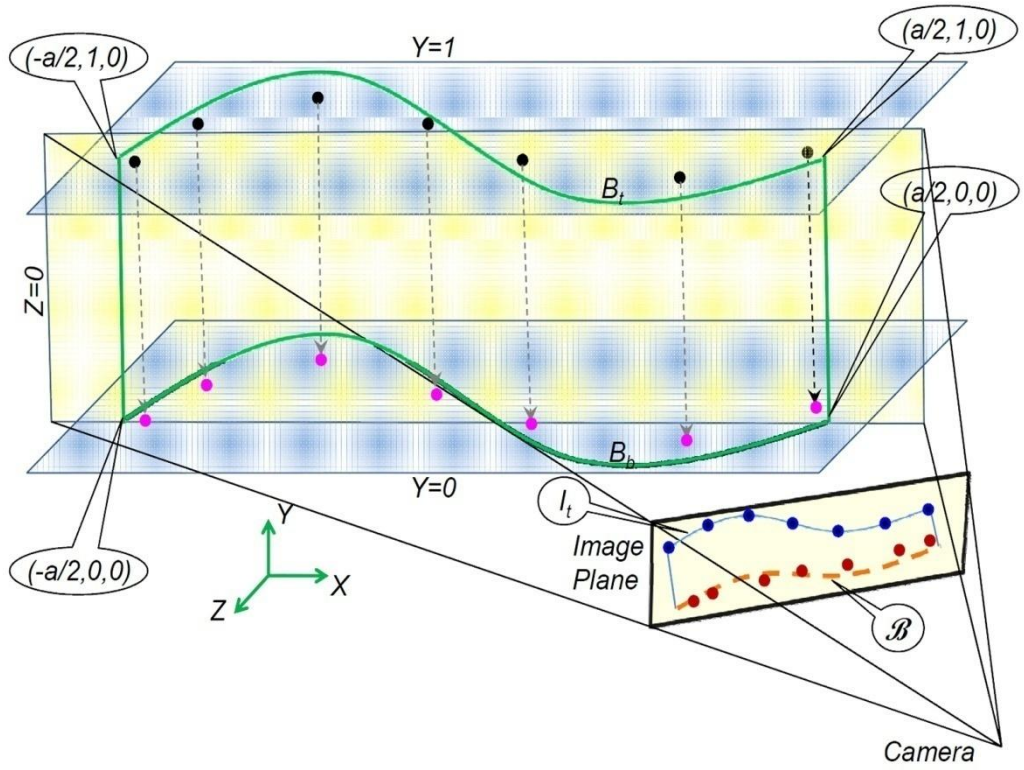

Abb. 2-6 Markerlose Kalibrierung von 3D-Flächen nach Sajadi (2009)

Im ersten Schritt des Algorithmus werden die intrinsischen und extrinsischen Parameter der Kamera bestimmt. Dies geschieht anhand der in den EXIF[31]-Daten gespeicherten Brennweite[32] und den in einem Foto erkannten vier Eckpunkten der Projektionsfläche und resultiert in einer Kameramatrix. Mit Hilfe dieser Matrix erfolgt einer Rückprojektion von Samples der unteren und oberen Begrenzungslinie im Kamerabildraum in den 3D-Raum durch Schnitte mit der unteren und oberen Begrenzungsebene der Projektionsfläche. Diese beiden Kurven sollten bis auf die vertikale Translation identisch sein. Aufgrund von Rekonstruktionsfehlern können sich diese beiden Kurven allerdings unterscheiden und werden daher gemittelt. Eine parametrisierte Repräsentation dieser Kurven wird durch polynomiales Curve Fitting gefunden. Die abschließende geometrische Registrierung erfolgt durch das Mapping von Projektorkoordinaten zu Displaykoordinaten mit einem Umweg über die Kamerakoordinaten. Die Korrespondenz zwischen Projektor- und Kamerakoordinaten wird mit Hilfe von rationalen Bezier-Patches definiert und mit dem Levenberg-Marquardt Gradienten-Abstiegsverfahren gelöst. Dazu werden Kreise projiziert, deren Zentren im Projektorraum bekannt sind und die sich auf uv-Koordinaten im Kameraraum abbilden. Ausgehend von diesen uv-Koordinaten werden Strahlen durch das 3D-Modell „geschossen“, wodurch eine 2D-Korrespondenz mit den Displaykoordinaten gefunden wird. Die Anwendung des Mappings von

[31] EXIF: Exchangeable image file format (JEITA 2002).

[32] Focal length.

Projektorkoordinaten zu Displaykoordinaten und die somit stattfindende Entzerrung der Projektion erfolgt wiederum in Echtzeit.

In Sajadi (2010) wurde das Verfahren für Projektionsflächen erweitert, die Diskontinuitäten wie z. B. Ecken aufweisen. Aufgrund des markerlosen Ansatzes entfällt eine aufwändige Modifizierung der dreidimensionalen Projektionsfläche. Betrachterunabhängigkeit wird erreicht, da die Kalibrierung bezüglich der Projektionsfläche folgt.

Da eine ideale Kamera ohne Linsenverzerrung angenommen wird, treten in der kalibrierten Projektion kleinere Fehler auf. Zur Erkennung einer Teilprojektion muss diese vollständig innerhalb der Projektionsfläche sein. Somit ist eine vollständige Ausnutzung der physikalischen Projektionsfläche nicht möglich. Ein Teil der Blobs muss von Hand registriert werden. Aufgrund des groben Blob-Samplings können lokale Fehler nicht korrigiert werden.

2.3.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Automatische Verfahren verringern den Einrichtungsaufwand einer Mehrkanalprojektion enorm. Die existierenden Verfahren weisen die folgenden Nachteile auf:

Einige Verfahren verlangen für gute Ergebnisse eine perfekte Kalibrierung der Projektoren-Kamera-Paare (siehe Kapitel 2.3.1 und 2.3.2) bzw. setzen eine ideale Kamera voraus (siehe Kapitel 2.3.7).

Bei Verfahren, die auf 3D-Rekonstruktion basieren, muss bekannt sein, wie die Projektoren zur Kamera ausgerichtet sind. Dazu werden dreidimensionale Kalibrierkörper oder planare Kalibriertafeln genutzt. Durch die Projektion von strukturiertem Licht auf diese Kalibriermittel und die anschließende Aufnahme mit einer Kamera kann bestimmt werden, wie die Projektoren und die Kamera im Verhältnis zum Kalibriermittel angeordnet sind.

Dabei werden zuerst die intrinsischen Parameter von Projektoren und Kamera bestimmt. Als intrinsische Parameter werden der Basispunkt[33], die Brennweite in u- und v-Richtung, die Scherung sowie die Linsenverzerrung bezeichnet.

Anschließend werden die extrinsischen Parameter bestimmt. Als extrinsische Parameter werden die Position von Kamera- oder Projektorzentrum sowie deren Orientierungsvektoren in Weltkoordinaten bezeichnet. Aufgrund dieser Informationen ist nunmehr bekannt, wie die Projektoren und die Kamera zueinander angeordnet sind. Eine ausführliche Beschreibung einer derartigen Systemkalibrierung ist bei Zhang (2005) nachzulesen.

[33] Oder auch Principle Point: entspricht dem optischen Zentrum des CCD-Sensors und kann von der Idealposition $(\frac{u}{2}, \frac{v}{2})$ abweichen.

Die Kalibrierung der Projektoren-Kamera-Paare basiert auf einem mathematischen Modell, also einer vereinfachten Darstellung der Wirklichkeit. In der Praxis verhalten sich digitale Kameras und Projektoren allerdings nicht vollständig modellkonform. Dies führt zu Fehlern bei der Systemkalibrierung, die sich in den folgenden Schritten der Kalibrierung von Multiprojektorsystemen fortpflanzen. Weitere Fehler können auch entstehen, wenn das real verwendete Kalibriermittel von seiner Beschreibung abweicht.

Wird von einer idealen Kamera (ohne Linsenverzerrung) ausgegangen, treten in der kalibrierten Projektion kleinere Fehler auf, da die gemessenen Werte leicht von ihrer realen Position abweichen.

Eine 3D-Rekonstruktion der Projektionsfläche ist rechenaufwändig und fehleranfällig. Das anschließend notwendige 2D-Image-Warping korrigiert die Fehler zwar lokal, vernachlässigt allerdings die somit eintretenden globalen Betrachtungsfehler (siehe Kapitel 2.3.1).

Wie bereits beschrieben, werden durch die Systemkalibrierung Ort und Orientierung von Projektoren und Kamera in Weltkoordinaten bestimmt. Anschließend wird auf die Projektionsfläche strukturiertes Licht projiziert. Aufgrund der mittlerweile bekannten Positionen von Projektoren und Kamera kann nunmehr eine 3D-Punktwolke der Teilprojektionsfläche (pro Projektor) bestimmt werden; die Punktwolken werden durch Triangulierung in Drahtgittermodelle[34] konvertiert. Dabei entsteht für jeden Projektor ein eigenes Mesh. Um ein virtuelles Abbild der Projektionsfläche zu erschaffen, müssen die Meshes aller Projektoren zu einem Gesamtmesh vereint werden. Ein kalibriertes Bild wird erzeugt, indem das Gesamtmesh in Echtzeit texturiert und anschließend aus Sicht jedes Projektors gerendert wird[35].
Da die Systemkalibrierung schon fehlerbehaftet ist, pflanzt sich dieser Fehler in der Rekonstruktion der Punktwolken fort. Des Weiteren ist zu bemerken, dass sich der Fehler in Abhängigkeit von der Objektgröße und der Objektentfernung vergrößert (Square Root Fall-off Rule; ThingLab). Somit beinhalten die Teilmeshes Abweichungen von der Realität. Da die Teilmeshes unabhängig voneinander rekonstruiert wurden, weist das vereinte Gesamtdrahtgittermodell weitere sichtbare Fehler im Blendbereich mehrerer Projektoren auf. Diese Fehler müssen in einem weiteren Schritt des Algorithmus (2D-Warp) korrigiert werden. Unter Umständen entstehen dadurch aber auch störende Welleneffekte.

[34] Auch als Meshes bezeichnet.

[35] Das texturierte Mesh wird aus Sicht einer Kamera, die die intrinsischen und extrinsischen Eigenschaften des jeweiligen Projektors aufweist, dargestellt. Da in überlappenden Bereichen die Helligkeit zu groß ist, wird dies durch Blending korrigiert.

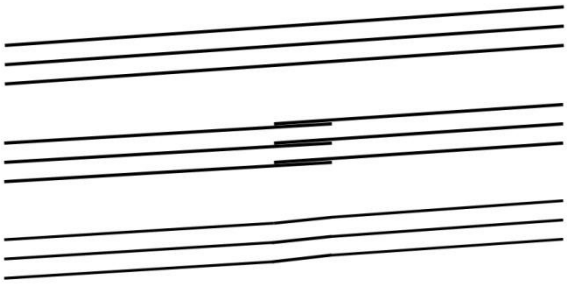

Abb. 2-7 Fehlerhafte Projektion nach 3D Rekonstruktion für Multiprojektorsysteme.

Im oberen Teilbild von Abb. 2-7 ist die gewünschte, bereits geblendete Projektion von zwei Projektoren abgebildet. Die drei Linien des linken und rechten Projektors liegen direkt übereinander, so dass sie als homogene Linien erscheinen. Im mittleren Teilbild wird der nach der 3D-Rekonstruktion auftretende Fehler im Überlappungsbereich zweier Projektoren dargestellt. Aufgrund des Rekonstruktionsfehlers liegen die Linien nicht übereinander. Im unteren Teilbild wurde der Überlappungsbereich mittels 2D-Warp korrigiert. Die linken und rechten Linienteile liegen zwar nun wieder übereinander, jedoch stört der auftretende Effekt den Gesamteindruck der Projektion.

Aufgrund der Verwendung von Homographien sind manche Algorithmen nur für perfekte planare oder als Quadrik beschriebene Projektionsflächen anwendbar. Abweichungen von der idealen Form führen zu sichtbaren Fehlern in der Projektion (siehe Kapitel 2.3.2, 2.3.3 und 2.3.4).

Bei diesen Verfahren liegt die Projektionsfläche als Modellbeschreibung vor. Mit Hilfe einer Transformationsmatrix wird das zu projizierende Bild an dieses Ideal angepasst. Diese globalen Transformationen korrigieren allerdings keinerlei lokale Abweichungen vom Modell. Sie gehen daher von perfekten Projektionsflächen und einer perfekten Systemkalibrierung aus. Wie bereits bekannt ist, trifft letzteres in der Praxis nicht zu.

Selbst unter der Annahme, dass die Systemkalibrierung perfekt wäre, weisen diese Methoden Fehler auf, da die Projektionsfläche üblicherweise nicht dem Modell entspricht. Bürowände weisen teilweise sichtbare Wölbungen oder Löcher auf. Projektionsflächen, die durch Quadriken definiert wurden, können sich aufgrund ihres Gewichts verformen oder können durch Fertigungsungenauigkeiten bereits Verformungen aufweisen.

Somit muss wiederum ein 2D-Warp durchgeführt werden, der weitere Fehler mit sich bringt.

Zur Kalibrierung bezüglich einer Projektionsfläche ist die Einmessung von perfekt angebrachten Referenzmarkern bzw. die Verwendung von Spezialhardware nötig (siehe Kapitel 2.3.3, 2.3.4 und 2.3.5).

Abgesehen davon, dass Referenzmarker den visuellen Eindruck einer Projektion empfindlich stören können, ist deren Anbringung und Einmessung zeitaufwändig und muss sehr sorgfältig durchgeführt werden. Wurden die Marker fehlerhaft angebracht bzw. eingemessen, führt dies auch zu Fehlern in der Kalibrierung.

Der Einsatz von Spezial-Hardware verringert die Flexibilität eines zu kalibrierenden Systems. Für die Kalibrierung mit eingebetteten Lichtsensoren (siehe Kapitel 2.3.3) wird beispielsweise eine spezielle Projektionsfläche benötigt. Das Verfahren funktioniert somit nur mit einer bestimmten Projektionsfläche.

Für die Kalibrierung bezüglich einer Kamera muss diese im so genannten Sweet Spot[36] aufgestellt werden. Ist dies nicht möglich, wirkt die Projektion verzerrt. Das Verfahren ist somit betrachterabhängig (siehe Kapitel 2.3.6).

Das Ziel eines Kalibrierverfahrens sollte eine betrachterunabhängige Kalibrierung sein, d. h., die kalibrierte Projektion sollte unabhängig von der Betrachterposition auch als solche wahrgenommen werden. Erfolgt die Kalibrierung bzgl. einer Kamera[37], kann dies nicht gewährleistet werden. Ist die Kamera nicht perfekt zu den Wänden des Raumes ausgerichtet, resultiert dies in einer gegenüber der Wand verdrehten Projektion. Dies ist aufgrund evolutionär erworbener bzw. erlernter Heuristiken unseres Wahrnehmungssystems selbst bei kleinen Abweichungen extrem störend. Eine detaillierte Diskussion wahrnehmungspsychologischer Einflüsse erfolgt im Kapitel 3.2.

Nutzerinteraktion schränkt den Bedienkomfort ein. Grobes Sampling und die Bedingung, dass eine Projektion vollständig innerhalb der Projektionsfläche sein muss, verringert die visuelle Qualität (siehe Kapitel 2.3.7).

Nutzerinteraktion – in diesem Fall die manuelle Registrierung von bestimmten Projektionsmustern – schränkt den Komfort einer automatischen Lösung ein und sollte daher nach Möglichkeit vermieden werden. Dies ist leicht durch die Projektion eindeutig identifizierbarer Muster möglich.

[36] In diesem Fall: die Position eines Betrachters.

[37] Die Ränder der kalibrierten Projektion sind dabei parallel zu den Rändern des Kamerasichtfensters. Das erzielte Ergebnis ist nur für einen einäugigen Betrachter im Kamerazentrum perfekt.

Wird die Projektionsfläche mit einer niedrigen Samplingrate abgetastet und weicht die Projektionsfläche von der erwarteten idealen Form ab, so treten sichtbare Artefakte auf, die sich durch dichteres Sampling vermeiden lassen. Der visuelle Eindruck lässt sich des Weiteren auch durch die vollständige Ausnutzung der physikalischen Projektionsfläche verbessern. Dazu muss es aber erlaubt sein, über den Rand der Projektionsfläche hinaus zu projizieren.

Die folgenden Punkte werden daher von den im Kapitel 4 vorgestellten Verfahren adressiert:

- Die Verfahren benötigen keinerlei Vorwissen über die Projektoren und die Kamera; es handelt sich um unkalibrierte Komponenten.
- Eine aufwändige und fehleranfällige Systemkalibrierung entfällt. Somit kann auf in der Planungsphase nicht vorhersehbare, aber in der Praxis auftretende Änderungen schnell eingegangen werden. Dadurch wird sowohl die Planungs- als auch die Aufbauphase verkürzt.
- Durch spezielle Filterverfahren und durch den Verzicht der Benutzung von idealisierenden mathematischen Beschreibungen der Projektionsfläche wird Subpixelgenauigkeit und per-Pixel-Kalibrierung – auch für fehlerhafte Projektionsflächen – erreicht. Dies erhöht den Eindruck einer homogenen Projektionsfläche, besonders bei geringen Entfernungen des Betrachters zur Projektionsfläche. Bei dreidimensionalen stereoskopischen Anwendungen erleichtert eine perfekt kalibrierte Projektion, die mit den in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren erreicht wird, das längere Arbeiten an der Projektionsfläche und das Betrachten derselben. Die aufgrund der menschlichen Anatomie[38] Kopfschmerzen verursachende (Murr 2009) und zu Störungen der räumlichen Wahrnehmung führende ortsversetzte vertikale Abweichung (Bergen 1999; Livingston 2006) tritt nicht auf. Der für das 3D-Sehen notwendige horizontale Versatz kann perfekt auf den Augenabstand des Betrachters eingestellt werden.
- Wird ein 3D-Modell der Projektionsfläche verwendet, kann es zu starken Abweichungen der realen Projektionsfläche vom Modell kommen. Dies führt zu einer fehlerhaften Kalibrierung, bzw. das 3D-Modell muss aufwändig an die praktischen Gegebenheiten angepasst werden. Um diesen Unsicherheitsfaktor auszuschließen, wird auf die Verwendung von 3D-Modellen vollständig verzichtet. Somit kommt es zu einer enormen Aufwandsminimierung und Qualitätssteigerung.
- Unter Berücksichtigung von trivialem Vorwissen sind die Algorithmen nicht nur auf perfekte Ebenen oder Quadriken limitiert. Sie können zusätzlich für eine Reihe von zweidimensionalen und dreidimensionalen, praxisrelevanten Projektionsflächen ein-

[38] Die Augen liegen auf einer horizontalen Linie. Aus diesem Grund können starke horizontale Abweichungen vom menschlichen Gehirn besser korrigiert werden als vertikale Abweichungen.

gesetzt werden. Eine Markierung der Projektionsfläche mit Markern oder Spezialhardware ist nicht nötig; die Projektionsfläche selbst dient als Referenzfläche bzw. -körper. Somit sind die Verfahren robust gegenüber Abweichungen von der idealen Kameraposition[39]. Der Kalibrierprozess wird daher nicht durch eine aufwändige Wahl der richtigen Kameraposition erschwert.

- Durch die Berücksichtigung wahrnehmungspsychologischer Aspekte sind die Ergebnisse der Kalibrierung betrachterunabhängig.
- Die Kalibrierung erfolgt in einem Schritt, ein Post-Warp zur Fehlerkorrektur ist nicht notwendig.

[39] Die Kamera muss sich nicht direkt vor dem Zentrum der Projektionsfläche befinden. Der Richtungsvektor der Kamera muss nicht orthogonal zur Projektionsfläche sein.

3 Grundlagen

Ein Multiprojektorsystem besteht neben den Projektoren zusätzlich aus einer Menge anderer Komponenten, wie z. B. digitale Kamera(s), ein Rechnercluster und eine Projektionsfläche. Die verwendete Software muss in der Lage sein, die Kamera und Projektoren anzusteuern, sowie die Verteilung des Gesamtbildes im Cluster übernehmen. Des Weiteren müssen unkalibrierte und kalibrierte Bilder in einer entsprechenden Bildwiederholrate (je nach Applikation mindestens 24 Hz) darstellbar sein, wobei die einzelnen Clients bzw. Projektoren des Clusters untereinander synchronisiert werden müssen, um eine ruckelfreie Gesamtprojektion zu gewährleisten. Diese an Hardware und Software gestellten Aufgaben werden im Kapitel „Systemarchitektur“ beschrieben.

Neben dieser eher technischen Sichtweise werden im Anschluss „Wahrnehmungspsychologische Aspekte“ erläutert. Diese Aspekte beeinflussen die menschliche Wahrnehmung und somit auch die Sicht auf eine Projektion. Durch die Berücksichtigung dieser Aspekte lässt sich der visuelle Eindruck einer Projektion verbessern bzw. Fehler bei deren Einrichtung vermeiden.

3.1 Systemarchitektur

Ein Multiprojektorsystem – wie es im Rahmen dieser Arbeit beschrieben wird – besteht aus einer Hardware- und einer Softwareschicht. Diese sollen im folgenden Kapitel näher betrachtet werden.

3.1.1 Hardware

Die Hardware des Systems besteht aus den folgenden Komponenten:

- Computercluster,
- Projektoren und Projektionsfläche,
- Digitalkamera
- Ein-/Ausgabegeräte

Das Cluster dient zur Berechnung und Darstellung der visuellen Inhalte (z.B. Kalibriermuster oder bereits kalibrierte Inhalte), der Synchronisation sowie zur Ansteuerung der Kamera. Die Projektoren können beliebig aufgestellt sein, sollten aber für beste visuelle Ergebnisse

scharf gestellt sein und auf die Projektionsfläche strahlen[40]. Die Kamera muss bei den vorgestellten Verfahren sämtliche Teilprojektionen „sehen“. Weitere Ein-/Ausgabegeräte sind für die Kalibrierung nicht relevant, können beispielsweise Maus, Tastatur oder PDA sein und werden der Vollständigkeit halber kurz erwähnt.

In diesem Abschnitt werden die Systemkomponenten und die an sie gestellten Anforderungen erläutert. In Projektionstechnik versierte Leser können diesen Abschnitt überspringen. In Abb. 3-1 ist ein möglicher Systemaufbau dargestellt.

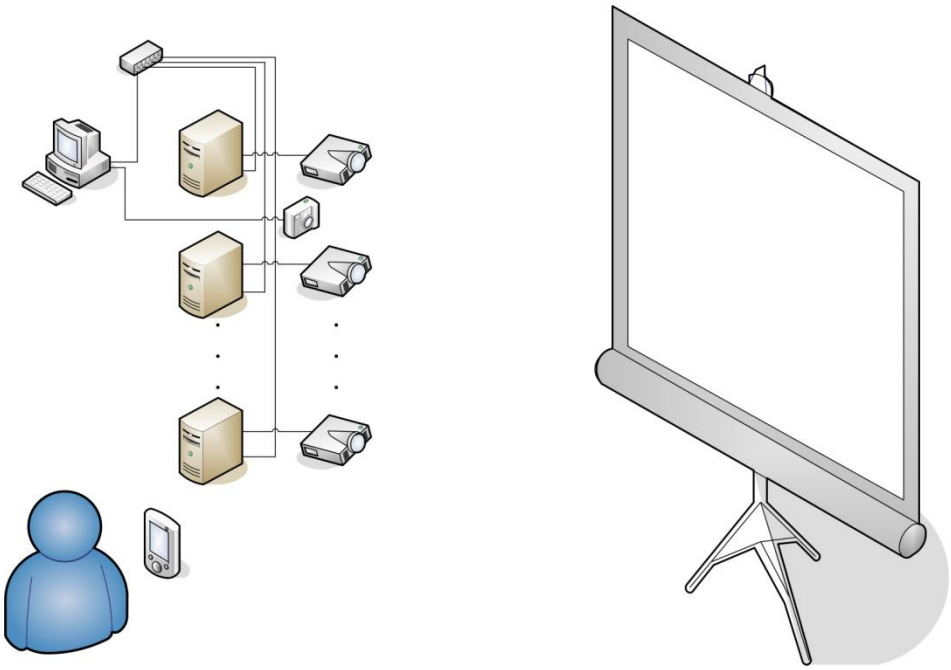

Abb. 3-1 Systemaufbau.

3.1.1.1 Computercluster

Ein Cluster besteht in der Regel aus einem Server und n Clients[41]. Server und Clients sind über ein Netzwerk miteinander verbunden. Der Durchsatz des Netzwerks muss entsprechend der Anzahl der Clients und den Anforderungen durch die Software spezifiziert werden. Liegen die zu visualisierenden Daten lediglich global auf einem schnellen RAID-Server vor (z. B. Transtec), muss ein Netzwerk mit hohem Durchsatz (> 1 Gbit/s) gewählt werden, damit die Daten in Echtzeit an die Clients verteilt werden können. Liegen die Daten lokal auf jedem Client vor, kann der Durchsatz des Netzwerks geringer ausfallen, da lediglich die Clients synchronisiert werden müssen.

[40] Ist die optische Achse der Projektoren nicht in etwa orthogonal zur Tangente der Projektionsfläche ausgerichtet, treten möglicherweise starke Defokussierungen in Teilbereichen des projizierten Bildes auf. Diese Effekte können teilweise korrigiert werden (Grosse 2008; 2009). Diese Verfahren liegen allerdings nicht im Fokus dieser Arbeit.

[41] Spezial-Set-ups mit nur einem Rechner, der bis zu vier Projektoren ansteuert, sind mit aktueller Hardware mittlerweile allerdings auch möglich.

Jeder Client ist mit einem oder mehreren Projektoren verbunden. Auf den Clients erfolgt die Berechnung der Bilder der jeweiligen Teilprojektion(en). Dazu gehören Rendering, Warping und Blending.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit dem Hardware/Software-System X-Rooms™ gearbeitet (X-Rooms; Isaković 2002) (siehe auch Abb. 3-2).

3.1.1.2 Projektoren und Projektionsfläche

Da mit dem System sowohl monoskopische als auch dreidimensionale stereoskopische Inhalte dargestellt werden sollen, müssen die Projektoren und Projektionsfläche so ausgewählt bzw. modifiziert werden, dass sie dazu in der Lage sind. Zur Darstellung dreidimensionaler stereoskopischer Bilder wird üblicherweise eines der nachfolgenden Verfahren genutzt (Bitmgmt 2006):

- passiv-Stereo-Projektion
    - Anaglyphen-Stereo-Filter[42]
    - Polarisationsfilter
    - Wellenlängen Multiplexing[43]
- aktiv-Stereo-Projektion
- autostereoskopische Projektion
    - Single-View
    - Multi-View.

Die Projektion kann dabei als Auf- oder Rückprojektion erfolgen. Die Art der Projektionsfläche ist wiederum vom eingesetzten Projektionsverfahren abhängig.

Bei ausschließlicher monoskopischer Projektion können beliebige Projektoren verwendet werden. Eine monoskopische Projektion benötigt keine spezielle Leinwand und kann somit auf beliebige Projektionsflächen erfolgen. Für beste visuelle Ergebnisse sollte diese aber weiß und diffus streuend sein. Im einfachsten Fall genügt eine weiße Bürowand.

Wird die passive Stereo-Projektionstechnik eingesetzt, müssen die Projektoren mit Pol-, Farb- oder Interferenzfiltern modifiziert werden. Jedes 3D-Stereo-Bild ist aus zwei Teilbildern zusammengesetzt – jeweils einem Bild für das linke und das rechte Auge[44]. Aus diesem Grund wird ein 3D-Stereo-Projektorpaar mit korrespondierenden Filtern ausgestattet. Bei der

[42] Beim Anaglyphen-Verfahren werden stereoskopische Halbbilder in Komplementärfarben eingefärbt. Beide Halbbilder werden übereinandergelegt. Die Trennung erfolgt mit einer Anaglyphenbrille.

[43] Auch Wavelength Multiplexing: Bildinformationen werden parallel in unterschiedlichen Wellenlängen-Tripeln untergebracht (Infitec; Jorke 2003).

[44] Im Gehirn werden die beiden Teilbilder – analog zum menschlichen 3D-Sehen – als dreidimensionale Darstellung interpretiert.

Polfiltertechnik können dies beispielsweise Filter sein, die nur horizontal polarisiertes Licht für das linke Auge und vertikal polarisiertes Licht für das rechte Auge passieren lassen. Der Betrachter trägt eine Filterbrille, die wiederum zu den an den Projektoren angebrachten Filtern passen muss, so dass eine Trennung der beiden Teilbilder erfolgen kann. Das passive Polarisationsfilter-Verfahren ist aufgrund der billigen 3D-Brillen und der einfachen Modifikation der Projektoren[45] am weitesten verbreitet. Des Weiteren können die Projektoren – im Gegensatz zum aktiven Verfahren – mit einfacher Standard-Bildwiederholrate arbeiten. Derzeit erlebt die passive Polarisations-Technik durch die Renaissance[46] von 3D-Kinofilmen einen lebhaften Aufschwung (Schulz 2009)[47].

Die passive Technik weist allerdings auch gravierende Nachteile auf. So lassen Polarisationsfilter nur ein Drittel des Projektorlichts hindurch und es müssen entsprechend lichtstarke und teure Projektoren eingesetzt werden. Außerdem erfolgt beim Einsatz von Polarisationsfiltern keine 100%ige Trennung zwischen den Teilbildern und die Projektion ist aufgrund des Einsatzes einer polarisationserhaltenden Leinwand blickwinkelabhängig[48]. Daher sollte man mittig vor der Projektionsfläche sitzen. Bei Verfahren, die auf Wellenlängen-Multiplexing basieren, ist die Modifikation der Projektoren aufwändiger[49], und der Farbraum der Projektoren wird erheblich eingeschränkt.

Die verschiedenen passiv-stereoskopischen Verfahren stellen unterschiedliche Anforderungen an die Projektionsfläche. Während Projektionen, die das Anaglyphen-Verfahren oder Wellenlängen-Multiplexing verwenden, auf eine weiße und diffus reflektierende Fläche projizieren sollten, wird für das Polarisationsfilter-Verfahren eine speziell beschichtete, polarisationserhaltende Leinwand benötigt[50]. Dies ist notwendig, da die polarisierten Teilbilder sonst nicht mehr mittels Polfilter-Brille getrennt werden können.

Aktiv-Stereo-Verfahren – auch als Zeitmultiplexverfahren bezeichnet – projizieren im Gegensatz zu den anderen hier genannten Verfahren das rechte und linke Teilbild nicht gleichzeitig. Die Teilbilder werden zeitlich versetzt projiziert. Daher muss bei diesem Verfahren ein Projektor eingesetzt werden, dessen Bildwiederholrate mindestens doppelt so hoch ist wie

[45] Die Filter können einfach vor die Linse gestellt werden. Im Kino könnte beispielsweise die Scheibe zwischen Zuschauer- und Vorführraum als Polarisationsfilter ausgeführt sein.

[46] Bereits in den 50er Jahren versuchte das Kino der zunehmenden Konkurrenz durch das Fernsehen mit 3D-Inhalten etwas entgegenzusetzen (3D-Film 2010).

[47] Im Kino wird allerdings auf eine Technik gesetzt, bei der der Projektor mit doppelter Bildwiederholrate arbeitet und abwechselnd das linke und rechte Bild darstellt und entsprechend polarisiert. Aufgrund der Trägheit des Auges werden die beiden aufeinanderfolgenden Frames für linkes und rechtes Auge als ein 3D-Bild interpretiert.

[48] Beim Einsatz einer polarisationserhaltenden Leinwand ist die Bildhelligkeit am größten, wenn man im 90°-Winkel zur Leinwand sitzt. Die wahrgenommene Helligkeit nimmt bei Verringerung dieses Winkels – in Abhängigkeit von der Kennlinie der Leinwand – rapide ab. Da man beim Mosaicking die Teilprojektionen aus unterschiedlichen Winkeln sieht, hat der Einsatz einer derartigen Leinwand den weiteren Nachteil, dass man die Projektion nicht mehr als homogen wahrnimmt.

[49] Die Filter werden im Strahlengang zwischen Linse und DLP-Chip angebracht.

[50] Ein so genannter Silverscreen.

die für den Betrachter gewünschte Bildwiederholrate. Soll diese beispielsweise 50 Hz betragen, so muss der Projektor eine Bildwiederholrate von 100 Hz aufweisen. Aufgrund der zeitlich versetzten Darstellung des linken und rechten Teilbildes muss es einen Mechanismus geben, der gewährleistet, dass der Betrachter das linke Teilbild mit dem linken Auge und das rechte Teilbild mit dem rechten Auge sieht. Für diesen Zweck werden Shutter-Brillen[51] eingesetzt. Bei den Brillen lässt sich der Verschluss der beiden Gläser unabhängig voneinander ansteuern. Die Brillen sind mit der Projektion synchronisiert. Wird das linke Teilbild dargestellt, ist der linke Shutter offen und der rechte Shutter geschlossen. Wird das rechte Teilbild dargestellt, ist der rechte Shutter offen und der linke Shutter geschlossen.

Der hauptsächliche Vorteil dieser Technik liegt darin, dass die Projektion im Vergleich zu passiven Verfahren heller und nicht blickwinkelabhängig ist. Trotz dieser Vorteile ist die Technik – insbesondere in Kinos[52] – weniger verbreitet. Dies liegt vor allem an den teureren Brillen, aber auch an der Anforderung der perfekten Synchronisation zwischen Projektion und Brille.

Aktive Verfahren stellen – wie die monoskopischen Projektionen – keine speziellen Anforderungen an die Projektionsfläche.

Autostereoskopische Verfahren kommen gänzlich ohne den Einsatz aktiver oder passiver Brillen aus. Es wird zwischen Single-View- und Multi-View-Autostereoskopie unterschieden.

Beim Single-View-Verfahren wird jeweils ein Bild für das linke und für das rechte Auge angezeigt. Um eine Trennung zwischen den beiden Ansichten zu erzeugen, wird eine Rundprismenscheibe eingesetzt. Die Trennung der beiden Ansichten ist lediglich für eine Kopfposition korrekt. Um ein freies Arbeiten zu gewährleisten, muss die Kopfposition des Nutzers verfolgt werden. Dies kann mittels zweier Kameras geschehen, die die Augen des Betrachters verfolgen[53]. Anhand der erfassten Augenposition wird das Linsenraster verschoben, so dass der Betrachter die beiden Ansichten korrekt als dreidimensionales Bild interpretiert (Surman 2006).

Beim Multi-View-Verfahren werden zwei oder mehr Projektoren eingesetzt. Jeder dieser Projektoren projiziert eine Ansicht der 3D-Szene. Im einfachsten Fall wird also die Ansicht für das linke und für das rechte Auge generiert; es ist aber auch möglich dermaßen viele Ansichten zu generieren, dass man bei Kopfbewegungen den Eindruck hat, um ein Objekt herumzusehen (Holografika 2009). Die Trennung der Ansichten erfolgt durch 3D-Filter-

[51] Shutter = Verschluss.

[52] Im 3D-Kino kommt beispielsweise ein Hybridverfahren von Dolby (Dolby3D) zum Einsatz. Der Betrachter trägt dabei eine passive Filterbrille; ein im Projektor integriertes, synchronisiert rotierendes Filterrad sorgt für die abwechselnde Darstellung des Bildes für das linke und rechte Auge (zeitliches Multiplexing). Aufgrund der schnellen Bildwiederholrate und der Trägheit des menschlichen Sehapparates, wird im Gehirn aus einem zusammengehörenden Paar ein einzelnes 3D-Bild erzeugt.

[53] Eye-Tracking.

Arrays. Da bei diesem Verfahren auf Eye-Tracking verzichtet wird, ist es für den Multibenutzer-Betrieb geeignet. Die verschiedenen Betrachter bekommen dann allerdings in Abhängigkeit ihrer Position unterschiedliche 3D-Ansichten zu Gesicht. Der offensichtliche Vorteil dieses Verfahrens ist der Verzicht auf die 3D-Brille. Allerdings müssen für eine stufenlose Darstellung der Bildinhalte viele verschiedene Ansichten der Szene aufgenommen bzw. generiert werden. Des Weiteren ist die Ansicht blickwinkelabhängig[54], wodurch diese Technik für den Einsatz im Kino nur bedingt geeignet erscheint.

Für Multi-View-Verfahren wird auch eine spezielle Projektionsfläche benötigt. Um die verschiedenen Ansichten der 3D-Szene zu trennen, werden 3D-Filter-Arrays eingesetzt. Mit diesen ist es möglich, die verschiedenen Ansichten in unterschiedliche Blickrichtungen projizieren zu lassen. Somit sind für unterschiedliche Betrachter – bzw. auch für das linke und rechte Auge – verschiedene Teile der Szene sichtbar, wodurch wiederum ein dreidimensionaler Tiefeneindruck entsteht (Relke 2004; NewSight 2009).

Andere Leinwandformen (gerahmt, wellenförmig oder zylinderförmig verformt) werden aus ästhetischen bzw. künstlerischen Gründen oder zur Erhöhung der Immersion eingesetzt. Insbesondere die Kapitel 4.1.2 und 4.1.3 beschäftigen sich mit Projektionen auf derartige Projektionsflächen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde hauptsächlich mit monoskopischen oder passiv stereoskopischen (Polarisationsfilter, Wellenlängen-Multiplexing) Verfahren gearbeitet. Die generelle Einsetzbarkeit der Algorithmen wurde für autostereoskopische Projektionen erfolgreich evaluiert. Es wurden modifizierte und unmodifizierte DLP[55]-Projektoren verschiedenster Hersteller verwendet. Als polarisationserhaltende Leinwand wurde ein portables System von DA-LITE genutzt (DA-LITE 2008).

3.1.1.3 Digitalkamera

Für die Kalibrierung von Multiprojektorsystemen müssen zahlreiche Kalibrierbilder aufgenommen werden. Dies geschieht mit einer Digitalkamera, die diverse Einstellmöglichkeiten aufweist:

- Bildauflösung
- Bildqualität
- Fokus

[54] Die Blickwinkelabhängigkeit bei autostereoskopischen Verfahren unterscheidet sich von der Blickwinkelabhängigkeit bei Polarisationsfilter-Verfahren. Bei autostereoskopischen Verfahren werden aus unterschiedlichen Betrachterpositionen – aufgrund des unterschiedlichen Blickwinkels – verschiedene Teile der Szene wahrgenommen. Sitzt man beispielsweise mittig und sieht dabei ein Gesicht direkt von vorn, betrachtet man dieses bei einer seitlichen Sitzposition lediglich von der linken bzw. rechten Seite.

[55] Digital Light Processing.

- Belichtungszeit
- Blende
- Empfindlichkeit
- Blitz.

Die verwendete Bildauflösung ist abhängig von der Anzahl der zu fotografierenden Projektionsbilder. Da bei den vorgestellten Verfahren die Kamera sämtliche Projektionen erfassen muss, sollte die Bildauflösung für gute Ergebnisse bei der Kalibrierung nicht zu gering gewählt werden. Aufgrund spezieller Filteralgorithmen stellt Subsampling[56] kein Problem dar. So wurde eine 8 x 8 Projektion (Mosaicking) erfolgreich und in guter Qualität mit einer Kameraauflösung von 1440 x 960 Pixeln kalibriert.

Um Speicherplatz zu sparen, werden digitale Fotografien bereits kameraseitig komprimiert. Dabei handelt es sich üblicherweise um eine JPEG-Kompression. Typische Einstellmöglichkeiten sind starke, mittlere oder geringe Kompression. Einige Kameras bieten auch die Möglichkeit, die Bilder unkomprimiert im RAW-Format[57] zu speichern. Je geringer die Kompression, desto besser ist die Bildqualität und umso größer wird die Datei. Bei starker Kompression können störende Kompressionsartefakte auftreten, die die anschließende Kalibrierung verfälschen. Um eine schnelle Übertragung an den Server zu gewährleisten, ist zwischen Bildgröße und -qualität abzuwägen. Normalerweise sollten Bilder mit geringer Kompression die Anforderungen für die automatische Kalibrierung erfüllen.

Viele Digitalkameras bieten die Möglichkeit, das Bild manuell oder automatisch scharf zu stellen[58]. Ein Objektpunkt wird als scharf wahrgenommen, wenn der Brennpunkt dieses Objekts auf dem Aufnahmesensor der Kamera liegt. Bei der Fokussierung wird die Brennweite so angepasst, dass das zu fokussierende Objekt scharf abgebildet wird. Aufgrund der Schärfentiefe werden sowohl Punkte vor als auch hinter dem Brennpunkt als noch ausreichend scharf abgebildet (Striewisch 2009).

Für die Erkennung von Kalibriermustern sind scharfe Abbildungen nicht unbedingt notwendig. Auch bei unscharfen Streifen lassen sich deren Schnittpunkte relativ gut bestimmen. Eine gute Fokussierung ist allerdings von Vorteil, da die verwendeten Filteralgorithmen bei scharfen Abbildungen robuster arbeiten[59].

Für die automatische Kalibrierung ist es allerdings essenziell, dass alle Kalibrierbilder

[56] Das Aufnahmemedium weist eine wesentlich geringere Auflösung als das Ausgabemedium auf.

[57] Rohdatenformat, bei denen die Bilder unbearbeitet und unkomprimiert abgespeichert werden, was größere Freiheiten bei der Nachbearbeitung erlaubt.

[58] Manueller Fokus und Autofokus. Ein Abriss der gängigen Algorithmen ist beispielsweise bei Hoffmann (2009) zu finden.

[59] Die automatische Erkennung des Filterschwellenwerts für die Binärfilterung funktioniert bei scharfen Abbildungen besser, da die Farbwerte für Streifen und Hintergrund in einem Histogramm besser voneinander abgetrennt sind.

denselben Bildausschnitt aufweisen. Ist dies nicht der Fall, kommt es zu sichtbaren Fehlern, da Kalibrierstreifen fälschlicherweise örtlich versetzt werden und somit auch deren Schnittpunkte fehlerhaft bestimmt werden, was wiederum zu falschen uv-Werten für das Image-Warping[60] führt.

Zu einem unterschiedlichen Bildausschnitt kann es kommen, wenn ein ortsunveränderliches Objekt mit unterschiedlichen Fokuseinstellungen fotografiert wird[61].

Aus diesem Grund sollte die Kamera über einen feststellbaren Fokus verfügen, der nur einmal initial eingestellt werden muss. Diese Einstellung kann manuell oder automatisch erfolgen. Wird die Einstellung mit einem automatischen passiven Autofokus-Verfahren[62] vorgenommen, sollte dafür eine gut strukturierte Grafik, wie z. B. ein Schachbrett oder ein Gitter, projiziert werden. Bei einem automatischen aktiven Verfahren[63] ist es wichtig, dass der Entfernungsmesser auf die Projektionsfläche gerichtet ist.

Beim Kalibriervorgang wird zur Entfernung störender Umgebungsobjekte ein Schwarzbild[64] von den Kalibrierbildern subtrahiert. Damit die relevanten hellen Segmente dieser Kalibrierbilder auch nach der Subtraktion noch sichtbar sind, muss die Belichtungszeit für die gesamte Bildsequenz konstant sein. Die Belichtungszeit kann entweder manuell oder automatisch anhand eines Streifenbildes eingestellt werden. Sie sollte so gewählt werden, dass die Streifen gut erkennbar sind.

Die Blende der Kamera sollte in Abhängigkeit des Einsatzszenarios eingestellt werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden Projektionsflächen mit geringer und großer Tiefe betrachtet. Eine hohe Blendenzahl – bei der die Öffnung der Blende kleiner wird – führt zu einer höheren Tiefenschärfe und ist somit für Projektionsflächen mit großer Tiefe zu bevorzugen. Die Blendenzahl sollte allerdings nicht zu hoch gewählt werden, da dies zu einer Beugungsunschärfe und einem insgesamt unscharfen Bild führt.

Blendenöffnung und Belichtungszeit hängen voneinander ab. Je kleiner die Öffnung, desto weniger Licht fällt auf den Aufnahmesensor. Somit muss länger belichtet werden. Um bei zwei Aufnahmen mit großer bzw. kleiner Blendenzahl die gleiche Bildhelligkeit zu erreichen, muss bei großer Blendenzahl länger belichtet werden.

Die Empfindlichkeit des Aufnahmesensors wird durch einen ISO-Wert spezifiziert. Je höher der ISO-Wert, desto empfindlicher ist der Sensor. Dies führt zu einer kürzeren Belichtungszeit, was allerdings mit höherem Bildrauschen verbunden ist. Da es im Rahmen der

---

[60] 2D-Textur-Look-up. Die uv-Koordinaten für diesen Look-up werden mit Hilfe der Kalibriermuster bestimmt.

[61] Unterschiedliche Fokuseinstellungen führen zu unterschiedlichen Brennweiten. Der Bildausschnitt einer Aufnahme wird u. a. durch die Brennweite festgelegt (Optik).

[62] Passive Autofokus-Verfahren basieren auf Kontrastmessung zwischen benachbarten Pixeln. Je höher der Kontrast, desto schärfer die Abbildung. Das Maximum einer Autofokus-Funktion entspricht der schärfsten Abbildung.

[63] Aktive Autofokus-Verfahren basieren auf Entfernungsmessung. Diese Messung kann mit Ultraschall oder Infrarot erfolgen.

[64] Alle Projektoren projizieren schwarz.

Arbeit nicht auf die Aufnahmegeschwindigkeit ankommt und höheres Bildrauschen einen negativen Einfluss auf die Bildfilterung hat, sollte der ISO-Wert möglichst niedrig eingestellt werden.

Der Blitz sollte für die Aufnahme der Kalibrierbilder in jedem Fall deaktiviert werden, da er einen großen Einfluss auf die Wahrnehmung der Projektion hat. Durch die Aufhellung kann es möglich sein, dass die Streifen nicht mehr vom Hintergrund der Projektionsfläche zu unterscheiden sind. Dies trifft insbesondere auf hochreflektierende Silverscreens zu.

Neben den genannten Eigenschaften sollten außerdem folgende Punkte beachtet werden.

Der Öffnungswinkel der Kamera sollte nicht zu groß sein, da dies zu starken Bildverzerrungen führt. Bei Fish-Eye-Linsen geraten automatische Korrekturverfahren an ihre Grenzen, da die chromatische Aberration[65] schlecht korrigiert werden kann (Heuvel 2006).

Eine zusätzliche kamerainterne Bildverarbeitung – wie z. B. Schärfefilter – sollten abgeschaltet werden, da diese zu Artefakten in den aufgenommenen Bildern führen kann (Halo). Dies verschlechtert wiederum die Ergebnisse der Kalibrierung.

Die Kamera, die das Bild aller Projektoren erfassen muss, wird über den Server angesteuert und muss die aufgenommenen Bilder auch an diesen senden. Dafür muss ein SDK[66] zur Verfügung stehen. Die Ansteuerung und der Datenabruf können beispielsweise über die USB-Schnittstelle erfolgen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit verschiedenen Kompakt- und Spiegelreflexkameras der Marke Canon gearbeitet.

Zur Verbesserung der Geschwindigkeit der Bildaufnahme können allerdings auch Firewire-, Highspeed- oder Video-Kameras eingesetzt werden. Die Datengröße eines Bildes lässt sich durch die Verwendung einer Graustufen-Kamera verringern, was wiederum zu einer höheren Datenübertragungsgeschwindigkeit führt. Werden die Kalibrierstreifen im nicht sichtbaren Infrarotbereich projiziert[67], muss die Kamera in der Lage sein, auch diese Informationen aufzunehmen. Dies kann durch Verwendung eines Infrarotfilters oder durch Entfernung des kamerainternen Infrarot-Blocking-Filters geschehen (Wooten 2001).

3.1.1.4 Ein-/Ausgabegeräte/optionale Erweiterungen

Die Steuerung der Kalibriersoftware erfolgt in der Minimalkonfiguration per Tastatur und Maus, kann aber auch mittels PDA/Smartphone erfolgen.

---

[65] Bezeichnung für einen Abbildungsfehler optischer Linsen. Licht unterschiedlicher Wellenlängen wird an Linsen unterschiedlich stark gebrochen. Dies führt an kontrastreichen Übergängen zu Farbsäumen, wodurch das Bild unscharf wirkt (CA 2010).

[66] Software Development Kit.

[67] Dies kann mit Hilfe eines modifizierten Projektors geschehen. Auf diese Weise lässt sich eine Kalibrierung während des Betriebes für den Nutzer nahezu unbemerkt durchführen.

Die Rendering-Software des X-Rooms-Systems verfügt über eine Input-Output-API (siehe Kapitel 3.1.2.2), die die Benutzung diverser Ein- und Ausgabemodalitäten ermöglicht (Grüttner 2004). Dazu gehören mittlerweile:

- kamerabasierter Annäherungssensor (Beyer 2009)
- magnetischer Tracker (Polhemus)
- Datenhandschuh (5DT 2007)
- Gyromäuse
- Gamepad, Joystick
- Touchpad
- Ergometer
- Mehrkanal-Soundsystem.

Da die API erweiterbar ist, lässt sich die Liste weiter ausbauen. Denkbar wären folgende Technologien:

- Multitouch-Bedienung bei Rückprojektionssystemen (Bollhoefer 2009; Han 2005)
- Wiimote, Wii Balance Board (Dumitrescu 2008).

Die genannten Ein-/Ausgabegeräte sind für die Kalibrier-Algorithmen nicht notwendig, erhöhen aber die Interaktivität bzw. Immersion des Systems.

3.1.2 Software

Auf Applikationsebene werden die folgenden beiden Systeme benötigt:

- Die Software AutoCalib zur Kalibrierung von Multiprojektorsystemen und
- das verteilte Renderingsystem DRS.

3.1.2.1 AutoCalib

Die im Rahmen des BMBF-Projektes LaserCAVE (Biehling 2004) entwickelte Kalibriersoftware AutoCalib wird auf dem Server ausgeführt und „kümmert“ sich um die Bildaufnahme und -filterung sowie um die Berechnung der Kalibrierdaten und Blendbilder. Die Kalibrierdaten sorgen dafür, dass die Teilbilder einer Gesamtprojektion so verzerrt werden, dass alle Teilbilder zusammen ein homogenes Gesamtbild erzeugen. Die Blendbilder maskieren nicht sichtbare Bereiche der Teilbilder und sorgen durch Anpassung der Helligkeit in überlappenden Bereichen für eine homogene Helligkeit der Gesamtprojektion.

3.1.2.2 Distributed Rendering System – DRS

Das DRS ist Teil des bereits erwähnten X-Rooms™-Systems. Es läuft synchronisiert auf Server und Clients und ist für Visualisierung, Interaktion und Synchronisierung zuständig (Die Systemarchitektur von X-Rooms wird in Abb. 3-2 dargestellt).

Das DRS dient der Darstellung der für die Kalibrierung benötigten Kalibriermuster auf den jeweiligen Clients. Zwischen AutoCalib und DRS existiert eine Schnittstelle, die dafür sorgt, dass das Rendering-System die gewünschten Kalibriermuster von einem bestimmten Client ausgeben lässt.

Die von AutoCalib erzeugten Kalibrierdaten und Blendbilder werden vom DRS benutzt, um eine verzerrungsfreie, homogene Gesamtprojektion zu erzeugen. Diese Daten werden mit Hilfe von Pixelshadern im letzten Schritt der Rendering-Loop, direkt vor der Ausgabe an den Bildgeber, auf die Teilbilder angewendet. Die unmodifizierten und somit auf der Projektionsfläche verzerrten Teilbilder werden dabei zuerst einem Image-Warping-Prozess unterzogen, wodurch die Teilprojektionen entzerrt werden und eine geometrisch homogene Gesamtprojektion bilden. Da diese Gesamtprojektion in den Überlappungsbereichen mehrerer Teilprojektionen noch zu hell ist, werden diese mit den Blendbildern moduliert[68]. Dies geschieht bei jedem Update der Rendering-Loop (siehe Abb. 3-3) und auf jedem der beteiligten Clients synchron.

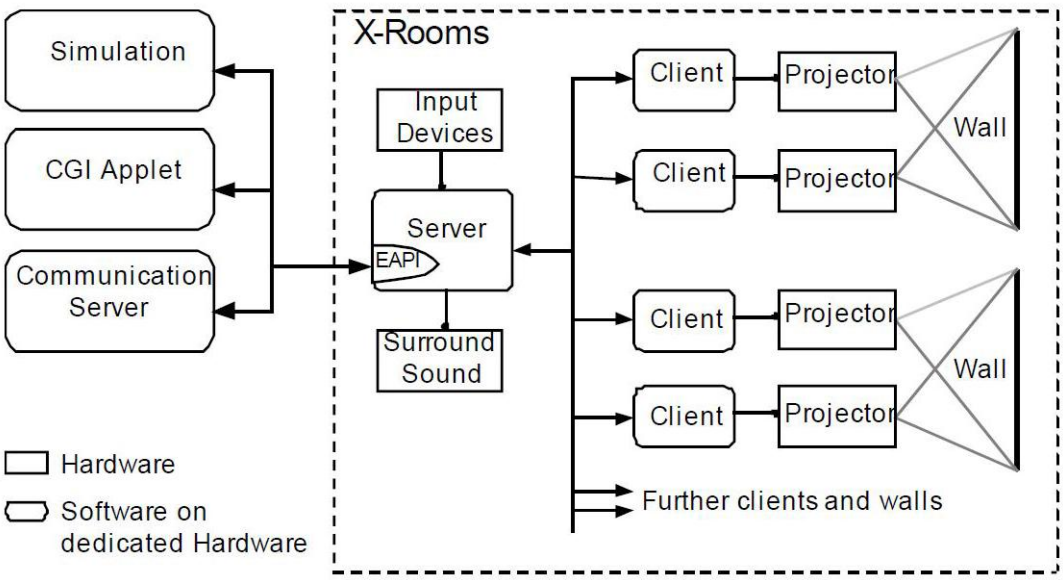

Abb. 3-2 X-Rooms-Systemarchitektur aus Isaković (2002).

[68] Multiplikation von gerendertem Bild mit dem Blendbild.

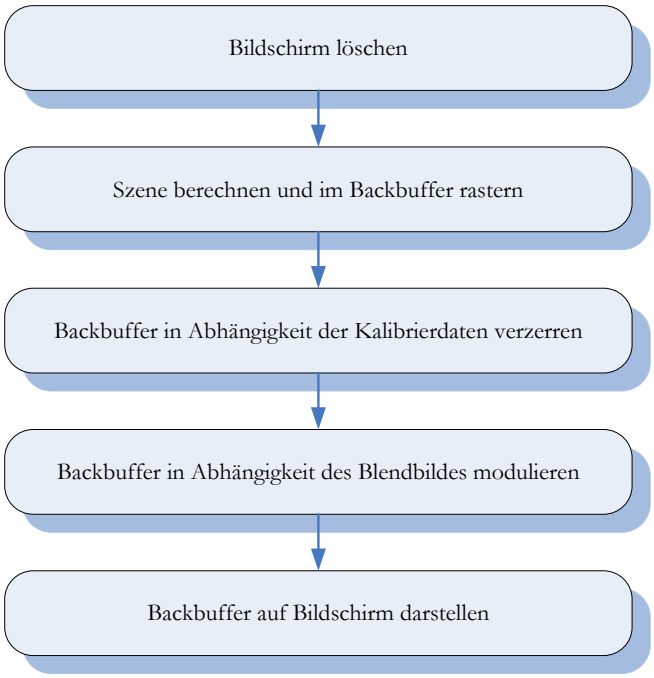

Abb. 3-3 Die Rendering Loop.

3.2 Wahrnehmungspsychologische Aspekte

Die Wahrnehmungspsychologie untersucht den subjektiven Anteil der Wahrnehmung. Dies ist notwendig, da zwischen den erfassten Reizen und der daraus interpretierten Wahrnehmung ein Unterschied besteht. Während der Verarbeitung von Reizen werden Informationen gefiltert, gruppiert und kategorisiert (WP). Die Wahrnehmungspsychologie liefert im Kontext dieser Arbeit wichtige Erkenntnisse darüber, wie eine Projektion unter Berücksichtigung ihrer Umgebung wahrgenommen wird und wann sie als betrachterunabhängig erachtet werden kann.

Wahrnehmungspsychologische Aspekte werden anhand eines Beispiels eingeführt. Anschließend werden die für diese Arbeit relevanten Regeln erläutert und im Anschluss auf Projektionen übertragen. Das Kapitel wird mit einer kurzen Zusammenfassung abgeschlossen.

3.2.1 Motivation – Das Gemäldegalerie-Phänomen

Die nachfolgend dargelegten Theorien sollen anhand eines kleinen praktischen Beispiels eingeführt werden.

Man stelle sich einen langen Saal in einer Gemäldegalerie vor. Links und rechts entlang des Gangs hängen lange Reihen von Gemälden parallel zum Boden und zur Decke. Obwohl sich diese vom Betrachterstandpunkt am Eingang des Saals nicht parallel zu dessen Blick-

feld befinden, würde ein Großteil der Betrachter nie auf die Idee kommen, die Bilder so umzuhängen, dass sie für diese eine Position gerade wirken[69].

Die sich nach hinten verjüngenden Wände werden aufgrund der perspektivischen Konvergenz[70] als Verbindung paralleler Begrenzungslinien erkannt. Wie im weiteren Verlauf dieses Kapitels gezeigt wird, erfolgt eine Orientierung an diesen horizontalen und vertikalen Strukturen. Daher werden die Bilder bezüglich dieser Strukturen ausgerichtet. Die Bilder selbst befinden sich in ihren Rahmen (lokales Referenzsystem) und an der Wand (globales Referenzsystem). Darüber hinaus sind die Bilder durch räumliche Nähe, Verbundenheit oder durch eine gemeinsame Region zu Gruppen angeordnet. Durch die parallele Ausrichtung dieser Gruppen bezüglich des globalen Referenzsystems erscheint die gesamte Szenerie für den Betrachter korrekt. Das hier beschriebene Phänomen ist auch auf projizierte Bilder erweiterbar und soll nachfolgend näher betrachtet werden.

3.2.2 Wahrnehmungspsychologische Regeln

Das einleitende Beispiel wird in diesem Kapitel auf Projektionen übertragen und hinsichtlich wahrnehmungspsychologischer Regeln analysiert. Wenn nicht anders kenntlich gemacht, entstammen die Erkenntnisse Goldstein (2008).

3.2.2.1 Verfügbarer und beachteter Stimulus

Der verfügbare Stimulus umfasst alle Objekte (bzw. Informationen), die wir in unserer Umwelt durch unser Wahrnehmungssystem[71] potenziell erfassen können. Beim Gemäldegalerie-Beispiel sind dies sämtliche Bilder sowie der Boden, die Decke und die Wände. In Abb. 3-4 wird der verfügbare Stimulus beispielhaft an einer Projektionsfläche, den dazugehörigen Stativen und der Projektion verdeutlicht. Unter Umständen enthält der verfügbare Stimulus so viele Informationen, dass die Aufmerksamkeit nur auf einen bestimmten Punkt gelenkt wird[72]. Somit wird aus dem verfügbaren Stimulus ein beachteter Stimulus. Steht der Betrachter beispielsweise dicht vor einem Gemälde und blendet alle anderen Informationen um ihn herum aus, enthält der beachtete Stimulus nur noch dieses Gemälde. Der beachtete Stimulus enthält somit alle Objekte, auf die sich der Betrachter jeweils konzentriert. Dies wird in Abb. 3-5 anhand der Projektion auf der Projektionsfläche aus Abb. 3-4 verdeutlicht. Der beachtete Stimulus muss nicht konstant sein und ändert sich, sobald andere Objekte fokussiert werden (siehe Abb. 3-6) oder aber die Konzentration des Betrachters gestört wird. In über-

[69] Aus eigener Erfahrung wissen die meisten Leser wahrscheinlich, wie seltsam ein schief aufgehängtes Bild wirken kann und wie lange man sich mit der korrekten Aufhängung beschäftigen kann.

[70] Die Wahrnehmung, dass zwei parallele Linien mit zunehmender Entfernung konvergieren.

[71] Umfasst alle menschlichen Sensoren; in dieser Arbeit werden aber lediglich die Augen betrachtet.

[72] Selektive Wahrnehmung.

schaubaren Umgebungen – und als solche ist die Umgebung in Abb. 3-4 oder eine Wand in einer Gemäldegalerie anzunehmen – kann der verfügbare (visuelle) Stimulus dem beachteten Stimulus entsprechen.

⇨ Es wird sowohl die Projektionsfläche als auch die Projektion beachtet. Die Projektion kann dabei bei überschaubaren Umgebungen nur mit großer Konzentration losgelöst von ihrer Projektionsfläche betrachtet werden.

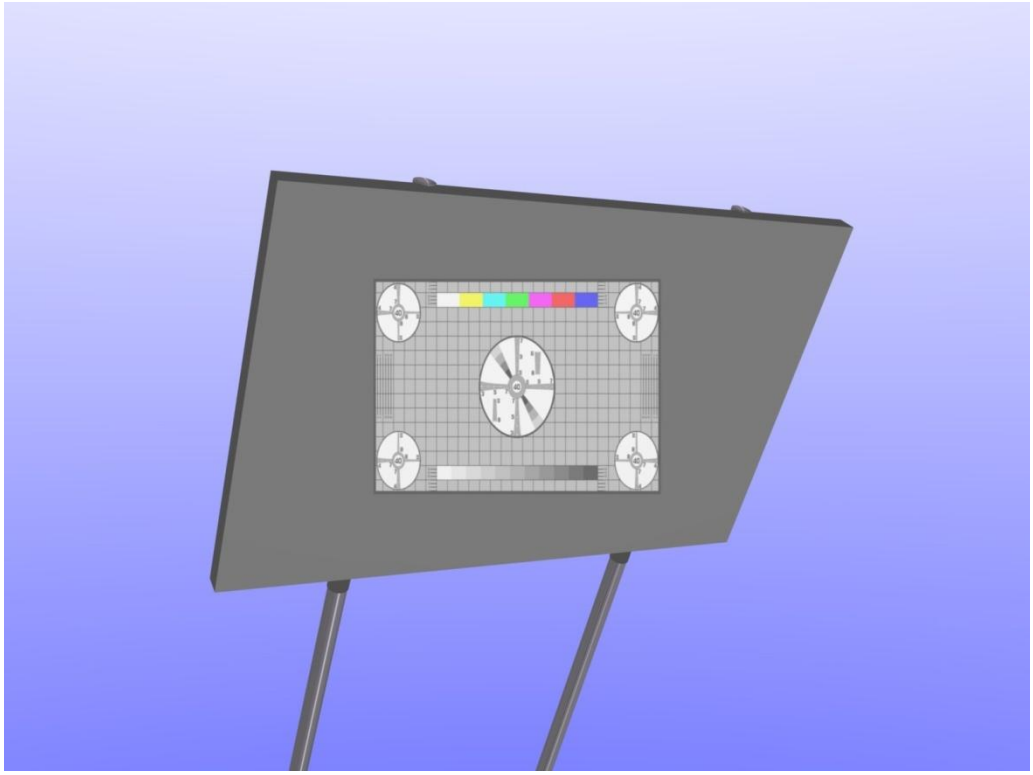

Abb. 3-4 Verfügbarer Stimulus – Projektionsfläche mit in Bezug auf die Kamera kalibrierter Projektion.

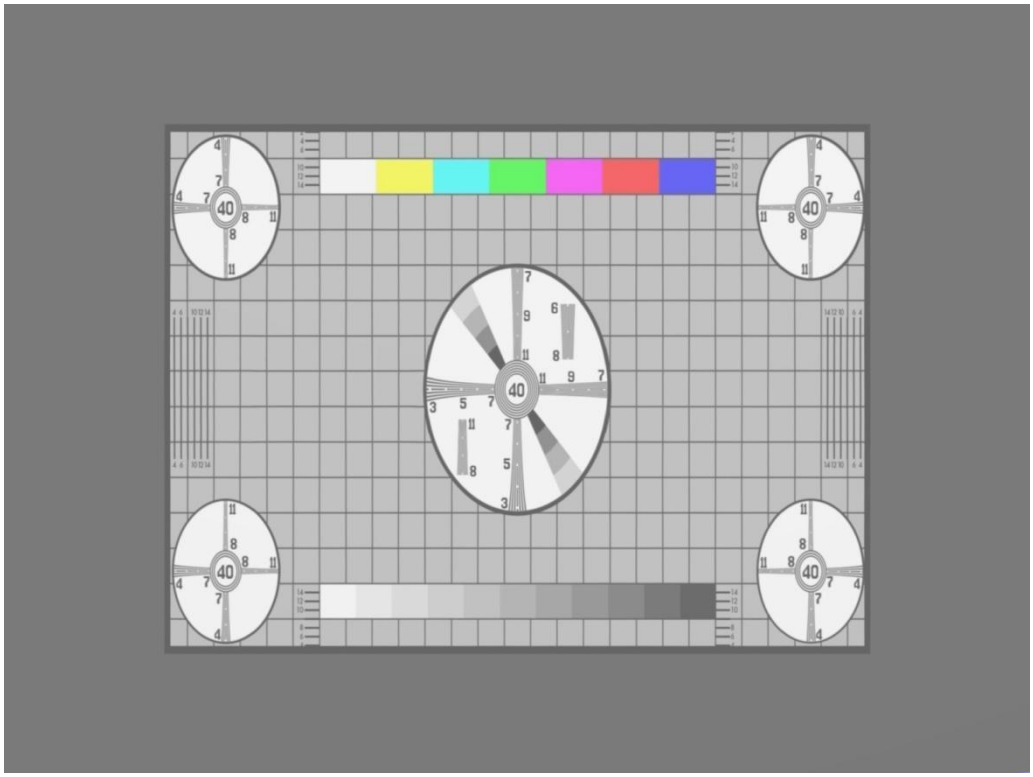

Abb. 3-5 Beachteter Stimulus – initial.

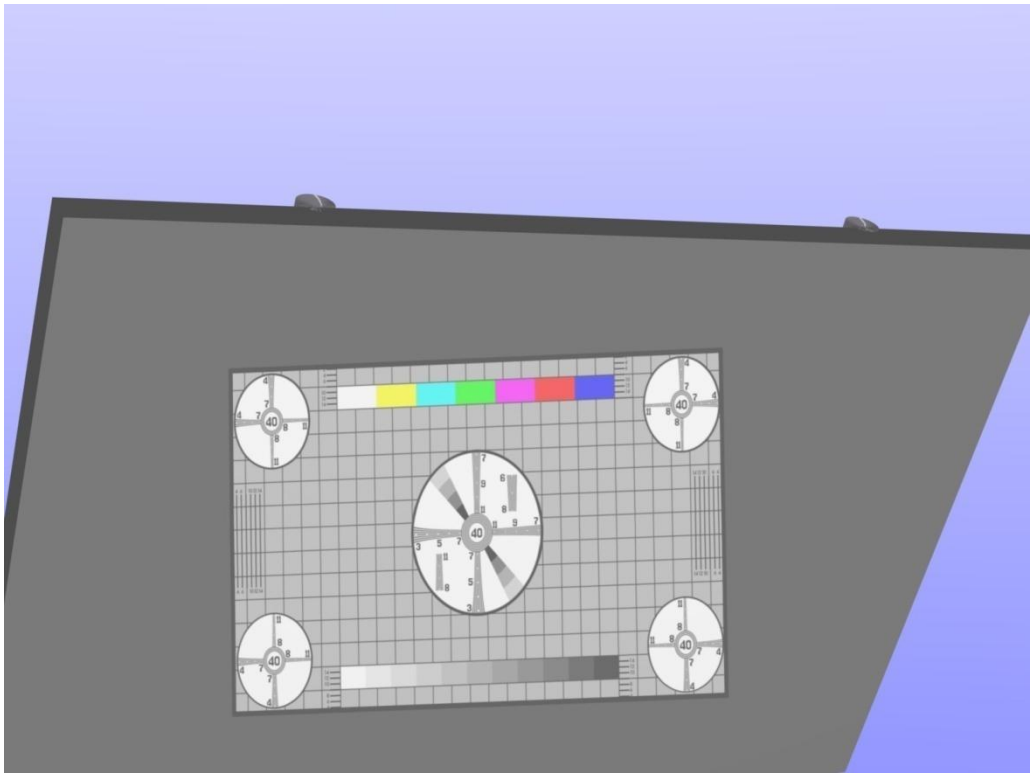

Abb. 3-6 Beachteter Stimulus – bei Umfokussierung.

3.2.2.2 Gestaltprinzipien

Gestaltprinzipien legen fest, wie kleine Teile in unserer Umwelt durch unser Wahrnehmungssystem zu einem Ganzen gruppiert werden. Es gibt beispielsweise das

- Prinzip der Nähe
- das Prinzip der Verbundenheit von Elementen (Palmer 1994) und
- das Prinzip der gemeinsamen Region (Palmer 1992).

In Abb. 3-7 werden die genannten drei Gestaltprinzipien dargestellt. Es wird deutlich, dass durch räumliche Verbundenheit, Verbindungselemente bzw. umschließende Rahmen eine unterschiedliche Gruppierung von Objekten erreicht wird. In der obersten Reihe der Abbildung werden unter Berücksichtigung des Prinzips der Nähe das zweite und dritte sowie das vierte und fünfte Element als Gruppe betrachtet. In der mittleren Reihe werden jeweils die durch die blauen Linien verbundenen Objekte als Gruppe interpretiert (Prinzip der Verbundenheit von Elementen). In der untersten Reihe werden anhand des Prinzips der gemeinsamen Region die ersten drei bzw. letzten drei Objekte aufgrund des Rahmens als jeweils eine Gruppe erfasst.

Die Gestaltprinzipien sind entgegen früheren Annahmen keine Gesetze, sondern lediglich Heuristiken. Mit ihnen sind – im Gegensatz zu einem Algorithmus – keine präzisen Vorhersagen über das Interpretationsverhalten eines Betrachters möglich. Es handelt sich lediglich um Faustregeln, die für einen Großteil der Betrachter die naheliegendste Lösung für ein Problem liefern.

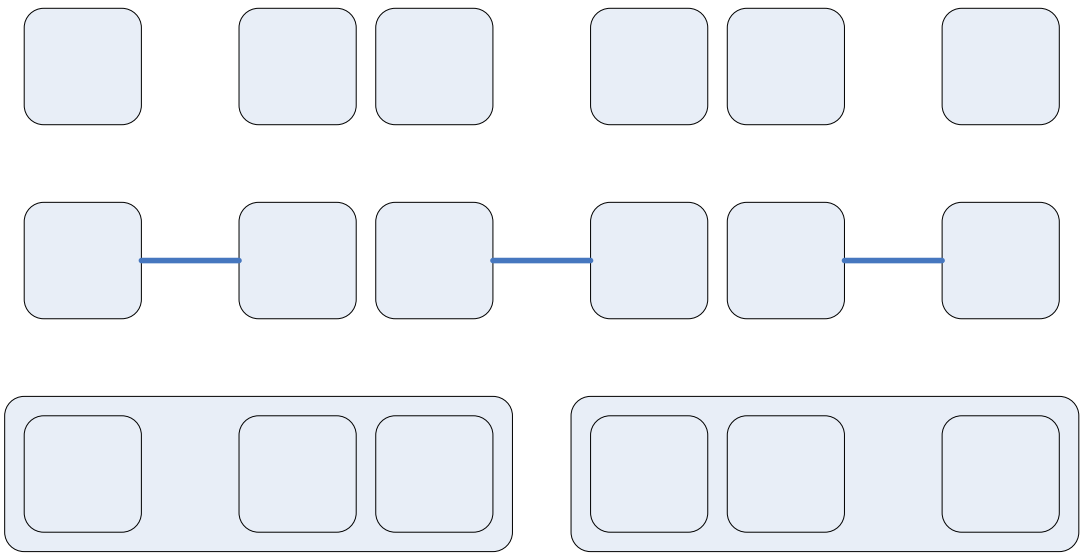

Abb. 3-7 Gestaltprinzipien.

Bezogen auf das einführende Beispiel werden beispielsweise nahe beieinander hängende Gemälde oder miteinander verbundene Gemälde als Gruppe erfasst. Aus einer gewissen Entfernung können auch Gemälde und Wand als Gruppe interpretiert werden. Diese Prinzipien lassen sich analog auf Projektionen und Projektionsflächen übertragen.

⇨ Zusammengehörige Objekte, wie die Projektion und die Projektionsfläche in Abb. 3-4, werden visuell in einer Gruppe zusammengefasst.

3.2.2.3 Objektwahrnehmung: erfahrungsabhängige Plastizität vs. Evolution

Erfahrungen verändern die Abstimmung von Neuronen[73] im menschlichen Cortex. Es gibt beispielsweise Regionen, die auf Buchstaben oder Wortformen reagieren. Da das Lesen erst seit wenigen Jahrhunderten verbreitet ist, kann dieses Antwortverhalten der Neuronen nicht ausschließlich evolutionär bedingt sein und es muss somit eine trainingsbedingte Verschiebung im Antwortverhalten der Neuronen geben. Diese wird erfahrungsabhängige Plastizität genannt. Spezialisierte Abstimmungen – wie die oben erwähnte „Wortformerkennung" – sind teilweise das Ergebnis dieser neuronalen Plastizität[74]. Sie ermöglicht den Neuronen, ihre Abstimmung an Objekte anzupassen, die häufig gesehen werden und für das Verhalten bzw. das Überleben in der Umwelt wichtig sind.

In der Natur treten Regelmäßigkeiten auf, die durch die Gestaltheuristiken widergespiegelt werden. Dies sind beispielsweise Gebiete gleicher Texturierung bzw. Farbe (Prinzip der Verbundenheit) oder leicht geschwungene Verläufe bzw. Konturen (Prinzip des guten Verlaufs). Eine Regelmäßigkeit, die von Coppola (1998) untersucht wurde, ist das Vorherrschen horizontaler und vertikaler Strukturen sowohl in natürlichen als auch künstlichen Umgebungen. Wenn angenommen wird, dass unser Wahrnehmungssystem auf diese Strukturen abgestimmt ist, werden Versuchspersonen empfindlicher auf die Wahrnehmung solcher Strukturen reagieren. Dies wird als Obliqueneffekt bezeichnet. Die Empfindlichkeit gegenüber horizontalen und vertikalen Strukturen scheint im Zusammenhang mit der Aktivität orientierungsspezifischer Neuronen zu stehen. Es gibt mehr Neuronen, die auf horizontal und vertikal orientierte Objekte als auf anders orientierte Objekte antworten. Diesen Neuronen ist auch entsprechend mehr Raum im visuellen Cortex zugewiesen.

Der Mensch hat sich daher an Ecken und Kanten gewöhnt, da diese in natürlichen und insbesondere künstlichen Umgebungen auf der Erde sehr häufig vorkommen. Unser Wahrnehmungssystem ist darauf spezialisiert, diese Strukturen korrekt zu interpretieren. Würden wir beispielsweise einen außerirdischen Planeten besiedeln – der andere Strukturen als die in unserer bekannten Umgebung vorherrschenden horizontalen und vertikalen Strukturen

[73] Zelle im Nervensystem, die elektrische Signale erzeugt und übermittelt.

[74] Im Vergleich dazu ist die Gesichtserkennung vermutlich evolutionär bedingt.

aufweist –, ist anzunehmen, dass wir uns aus evolutionären Gründen anpassen würden, so dass die Neuronen stärker auf die dort vorherrschenden Strukturen reagieren würden.

Es ist nicht ganz klar – für unsere Anwendung aber auch nicht weiter von Interesse –, ob die Gewöhnung an horizontale und vertikale Strukturen hauptsächlich evolutionär über Jahrtausende geformt worden ist oder innerhalb relativ kurzer Zeit durch erfahrungsabhängige Plastizität erlernt wurde.

- ⇨ Horizontale und vertikale Strukturen, wie z. B. die Projektionsfläche in Abb. 3-4, treten in natürlichen und künstlichen Umgebungen sehr häufig auf.
- ⇨ Eine erlernte bzw. evolutionär bedingte Gewöhnung an diese Strukturen ist erfolgt.
- ⇨ Mit Training kann eine Gewöhnung an andere Strukturen erfolgen.

Übertragen auf eine Projektion ist somit anzunehmen, dass wir die horizontalen und vertikalen Begrenzungen der Projektionsfläche bzw. der Wand auf die projiziert wird, intuitiv als Referenzfläche erkennen.

3.2.3 Lokales und globales Referenzsystem / Betrachterunabhängigkeit

Wie bereits erwähnt, lässt sich zwischen lokalem und globalem Referenzsystem unterscheiden. Das lokale Referenzsystem entspricht im Gemäldegalerie-Beispiel dem Bilderrahmen, das globale Referenzsystem der Wand, an dem das Gemälde angebracht ist. Die Analogie zwischen Gemäldegalerie und Projektion ist wiederum leicht herstellbar. Das lokale Referenzsystem ist entweder das Sichtfenster der für die Kalibrierung genutzten Kamera oder ein physikalischer Rahmen, in den die Projektion eingepasst werden soll[75]. Das globale Referenzsystem ist die Wand, auf die projiziert wird.

Wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt wurde, werden Objekte gruppiert und es erfolgt eine Orientierung an gewissen Strukturen. Steht das lokale Referenzsystem im Widerspruch zum globalen Referenzsystem, wird die Projektion als unschön wahrgenommen. Aus diesem Grund müssen beide Referenzsysteme in Einklang gebracht werden. Erfolgt dieser Abgleich, wird außerdem Betrachterunabhängigkeit erreicht (siehe auch das einführende Gemäldegalerie-Beispiel). Somit wirkt die Projektion zwar nicht immer rechtwinklig, aber für jeden potentiellen Betrachter im Raum als ästhetisch ansprechend.

In Abb. 3-8 und Abb. 3-9 wird eine unkalibrierte Projektion aus Sicht der Kamera bzw. aus Sicht eines Betrachters im Raum dargestellt. In beiden Abbildungen wirkt die Projektion verzerrt, da sie weder bezüglich des Sichtfensters der Kamera, noch bezüglich der Wand

[75] Dabei kann es sich um einen echten Rahmen handeln bzw. um eine Projektionsfläche, bei der die Projektion über diese hinaus geht und die Bildinhalte im Zuge der Kalibrierung an diese Fläche angepasst werden.

ausgerichtet ist. In Abb. 3-10 und Abb. 3-11 wirken die beiden bereits kalibrierten Ansichten korrekt, da die Kamera bezüglich des globalen Referenzsystems ausgerichtet ist. Die Kalibrierung erfolgte bezüglich des lokalen Referenzsystems Kamera und dem globalem Referenzsystem Wand (siehe Abb. 3-12; hier und in den folgenden Abbildungen: grünes Koordinatensystem: lokales Referenzsystem; rotes Koordinatensystem: globales Referenzsystem). Die kalibrierte Projektion ist somit betrachterunabhängig.

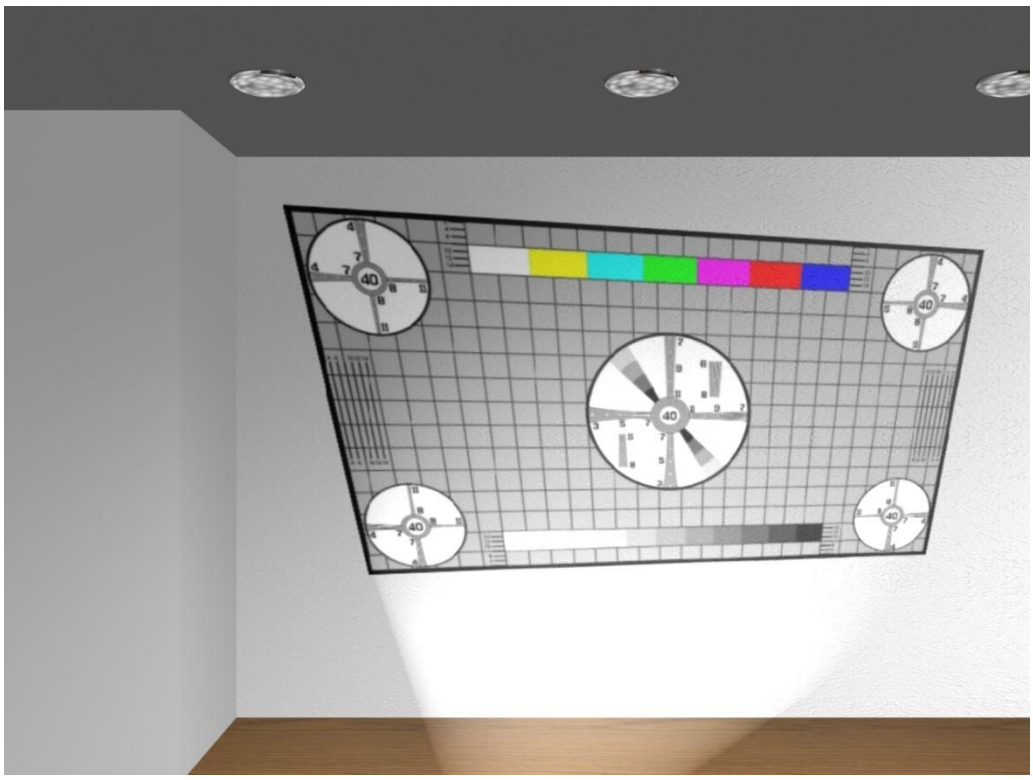

Abb. 3-8 Unkalibrierte Projektion aus Sicht der Kamera (Wandprojektion).

Abb. 3-9 Unkalibrierte Projektion aus Sicht des Betrachters (Wandprojektion).

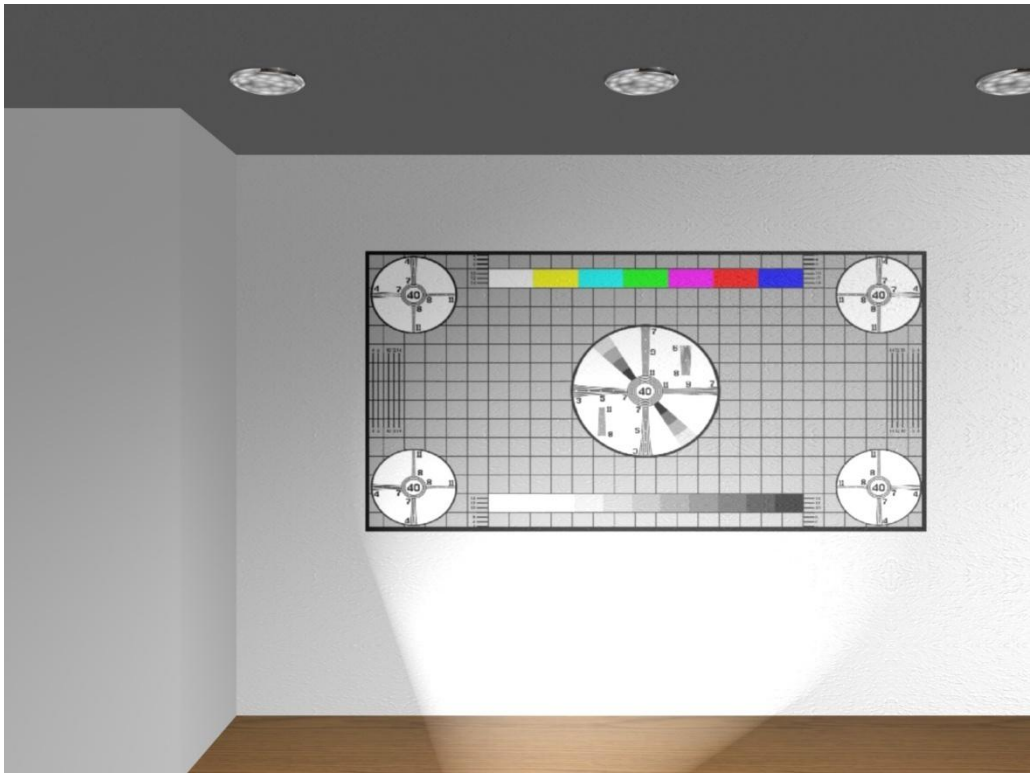

Abb. 3-10 Bezüglich der Kamera kalibrierte Projektion aus Sicht der Kamera (Wandprojektion, gerade Kamera).

Abb. 3-11 Bezüglich der Kamera kalibrierte Projektion aus Sicht des Betrachters (Wandprojektion, gerade Kamera).

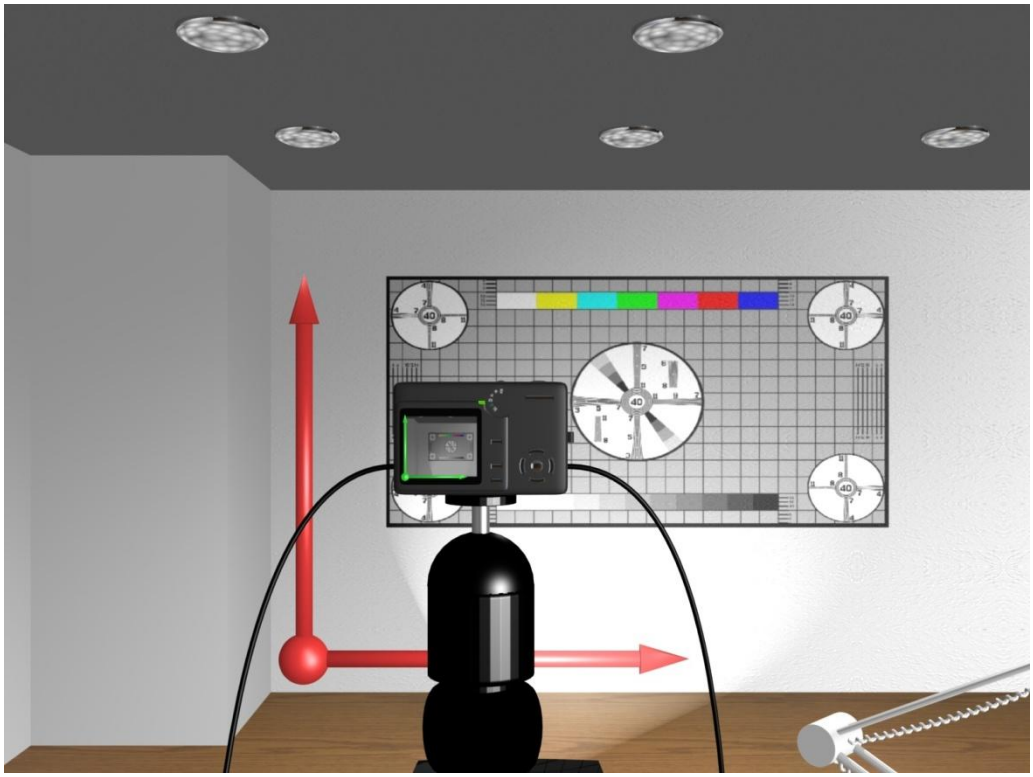

Abb. 3-12 Das lokale Referenzsystem ist gleich dem globalen Referenzsystem (Wandprojektion).

Kalibriert man wiederum die verzerrten Projektionen aus Abb. 3-8 und Abb. 3-9, rotiert allerdings die Kamera gegenüber dem globalen Referenzsystem, so ist die kalibrierte Projektion ebenso gegenüber dem globalen Referenzsystem rotiert (siehe Abb. 3-13 und Abb. 3-14). Man mag die kalibrierte Projektion aus Kamerasicht – insbesondere wenn sich diese dicht vor der kalibrierten Projektion befindet – noch als gut erachten (siehe Abb. 3-13). Sobald sich aber der Betrachter vom Kamerastandort entfernt, erscheint diese als offensichtlich gegenüber der Wand verdreht (siehe Abb. 3-14)[76]. Lokales und globales Referenzsystem sind nicht aufeinander abgestimmt (siehe Abb. 3-15). Die kalibrierte Projektion ist somit nicht betrachterunabhängig.

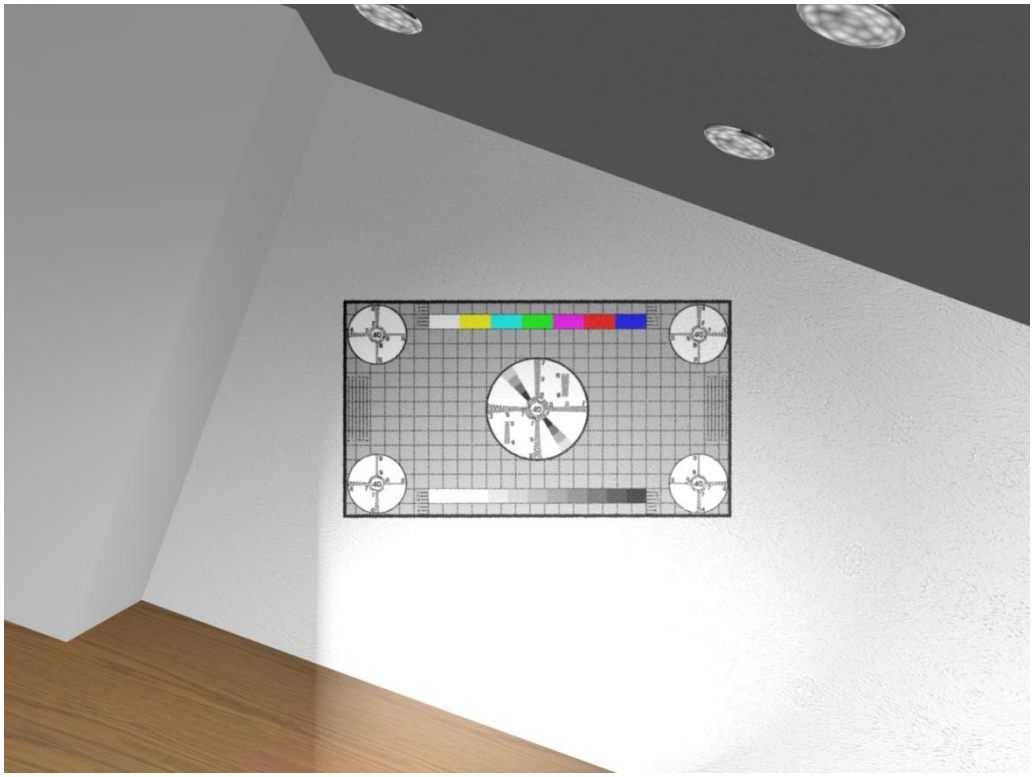

Abb. 3-13 Bezüglich der Kamera kalibrierte Projektion aus Sicht der Kamera (Wandprojektion, rotierte Kamera).

[76] Vergleiche auch verfügbarer und beachteter Stimulus, Gruppierung anhand Gestaltprinzipien sowie Orientierung an vertikalen und horizontalen Strukturen

Abb. 3-14 Bezüglich der Kamera kalibrierte Projektion aus Sicht des Betrachters (Wandprojektion, rotierte Kamera).

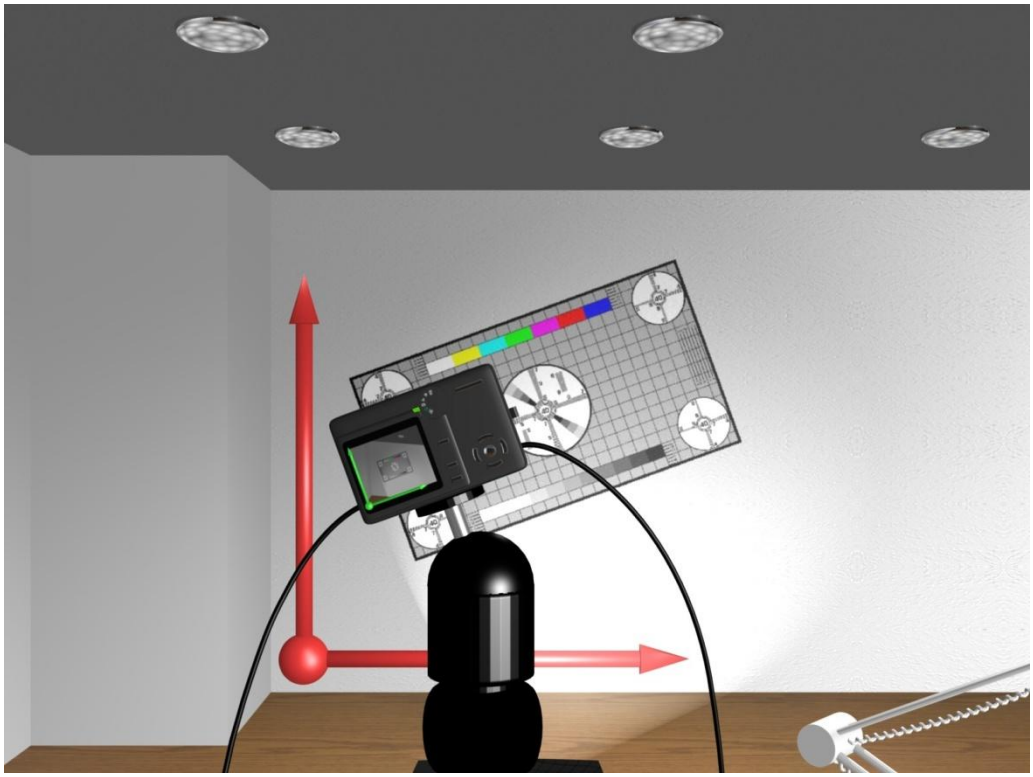

Abb. 3-15 Das lokale Referenzsystem ist ungleich dem globalen Referenzsystem (Wandprojektion).

Für relativ gerade Wände verhalten sich Gemälde und Projektionen nahezu identisch. Eine zweidimensionale Abbildung ist vor bzw. auf einer zweidimensionalen Fläche „angebracht“. Betrachtet man allerdings dreidimensional verformte Projektionsflächen wie z.B. im nachfolgenden Beispiel eine Ecke, so treten Unterschiede zu Tage.

Da eine Projektion im Gegensatz zu einem Gemälde über keine physikalische Präsenz verfügt, schwebt sie nicht vor der Ecke sondern wird entsprechend verzerrt abgebildet. In Abb. 3-16 wird eine derartige Projektion aus Sicht der Kameras und in Abb. 3-17 aus Sicht eines Betrachters dargestellt. Die Projektion ist weder bezüglich der Kamera noch bezüglich der Referenzfläche ausgerichtet.

Die bezüglich der Kamera kalibrierte Projektion in Abb. 3-18 wirkt wiederum auf den ersten Blick korrekt. Die Projektion scheint aus Sicht der Kamera vor der Ecke zu schweben. Betrachtet man allerdings dieselbe kalibrierte Projektion aus einem andern Blickwinkel (siehe Abb. 3-19), so wird diese Illusion rasch zerstört. Die in der ersten Abbildung noch regelmäßig erscheinenden Elemente (Kreise, Quadrate), wirken aus der Sicht des Betrachters vollkommen verzerrt. Dies ist in der Verschiedenheit des lokalen und globalen Referenzsystems und der nicht perspektivisch angepassten Projektion begründet (siehe Abb. 3-20). Eine Kalibrierung bezüglich eines zweidimensionalen lokalen Referenzsystems ist somit für dreidimensional stark verformte Projektionsflächen ungeeignet. Die kalibrierte Projektion ist nicht betrachterunabhängig.

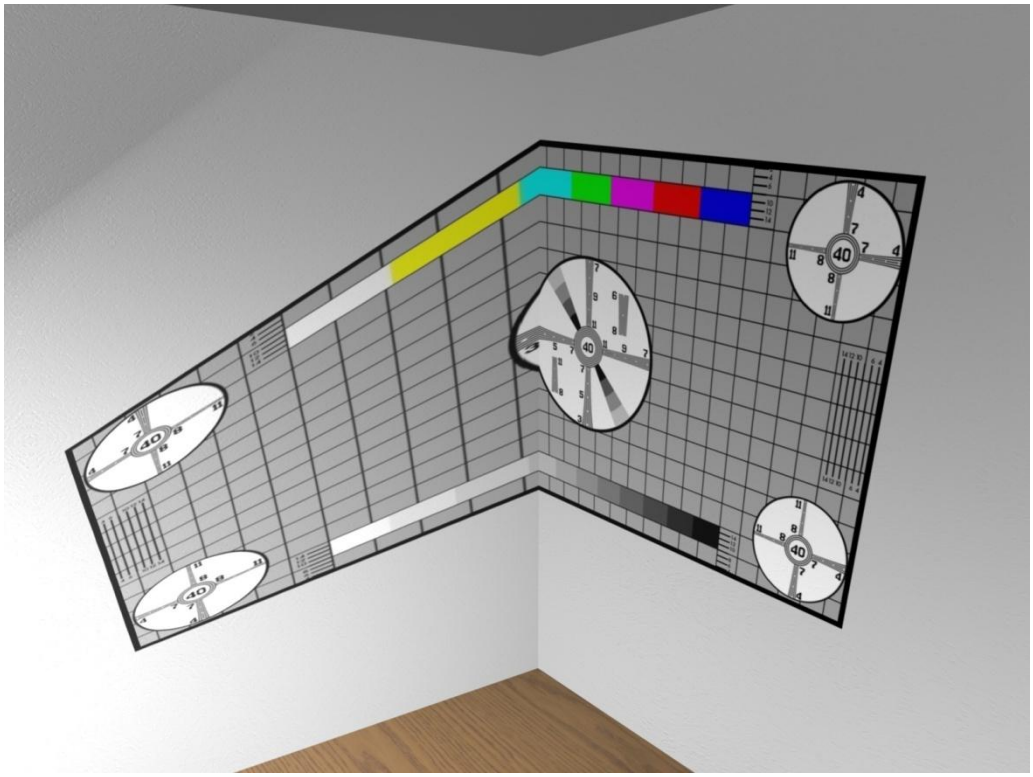

Abb. 3-16 Unkalibrierte Projektion aus Sicht der Kamera (Eckenprojektion).

Abb. 3-17 Unkalibrierte Projektion aus Sicht des Betrachters (Eckenprojektion).

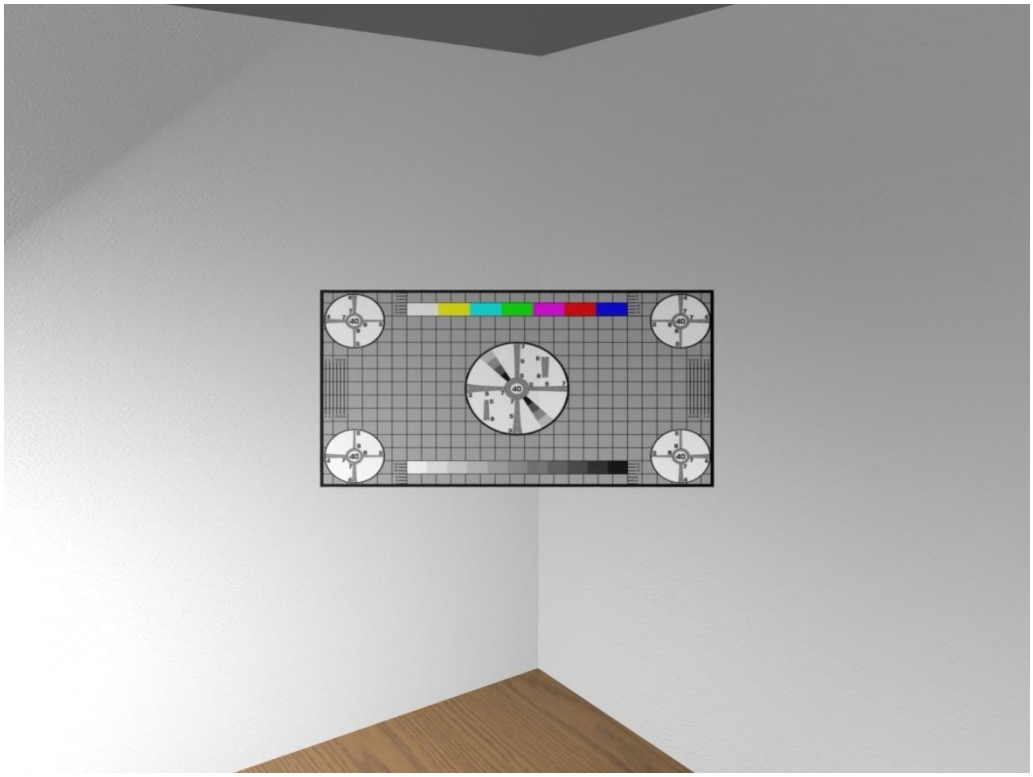

Abb. 3-18 Bezüglich der Kamera kalibrierte Projektion aus Sicht der Kamera (Eckenprojektion).

Abb. 3-19 Bezüglich der Kamera kalibrierte Projektion aus Sicht des Betrachters (Eckenprojektion).

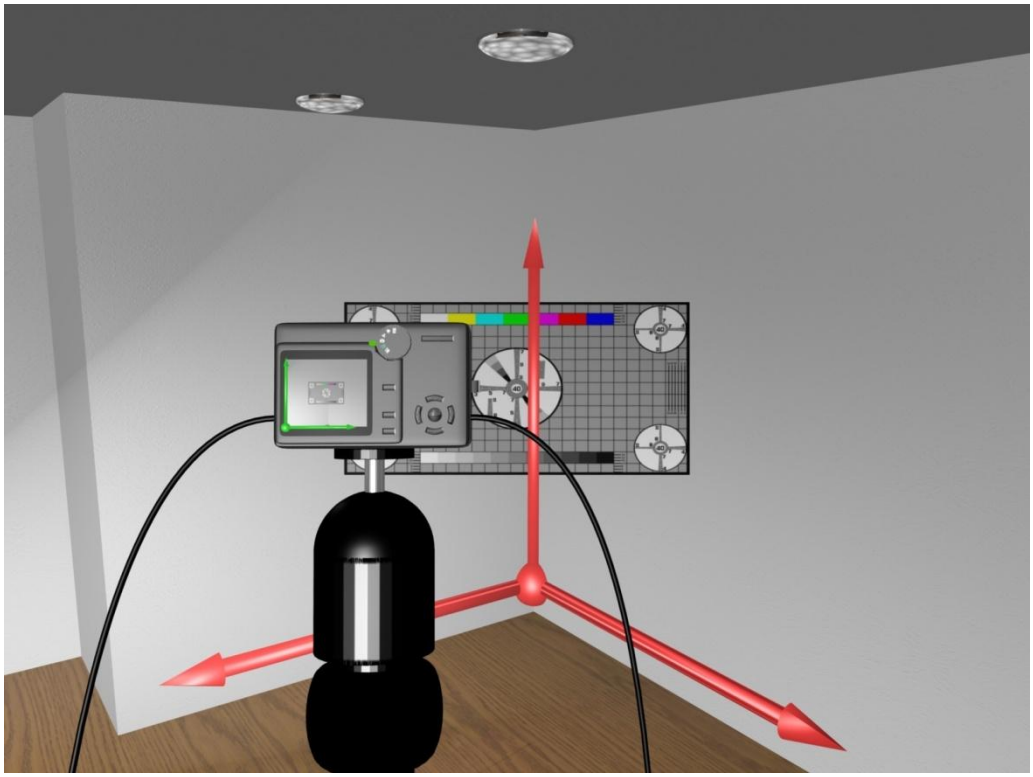

Abb. 3-20 Das lokale Referenzsystem ist ungleich dem globalen Referenzsystem (Eckenprojektion).

Somit muss die dreidimensionale Struktur der Projektionsfläche erkannt werden und die kalibrierte Projektion analog einer Tapete auf dieser Projektionsfläche „abgerollt“ werden. Die in Abb. 3-21 und Abb. 3-22 dargestellte kalibrierte Projektion, folgt diesem Prinzip und den zuvor beschriebenen wahrnehmungspsychologischen Aspekten. Obwohl sie aus Kamerasicht (Abb. 3-21) nicht mehr gerade ist, wird sie aber vom Betrachter intuitiv als korrekte Lösung erkannt, da sie an die Umgebungsgeometrie angepasst ist und sich insbesondere an den horizontalen und vertikalen Raumstrukturen orientiert. Lokales und globales Referenzsystem stimmen überein (siehe Abb. 3-23). Die kalibrierte Projektion ist somit betrachterunabhängig.

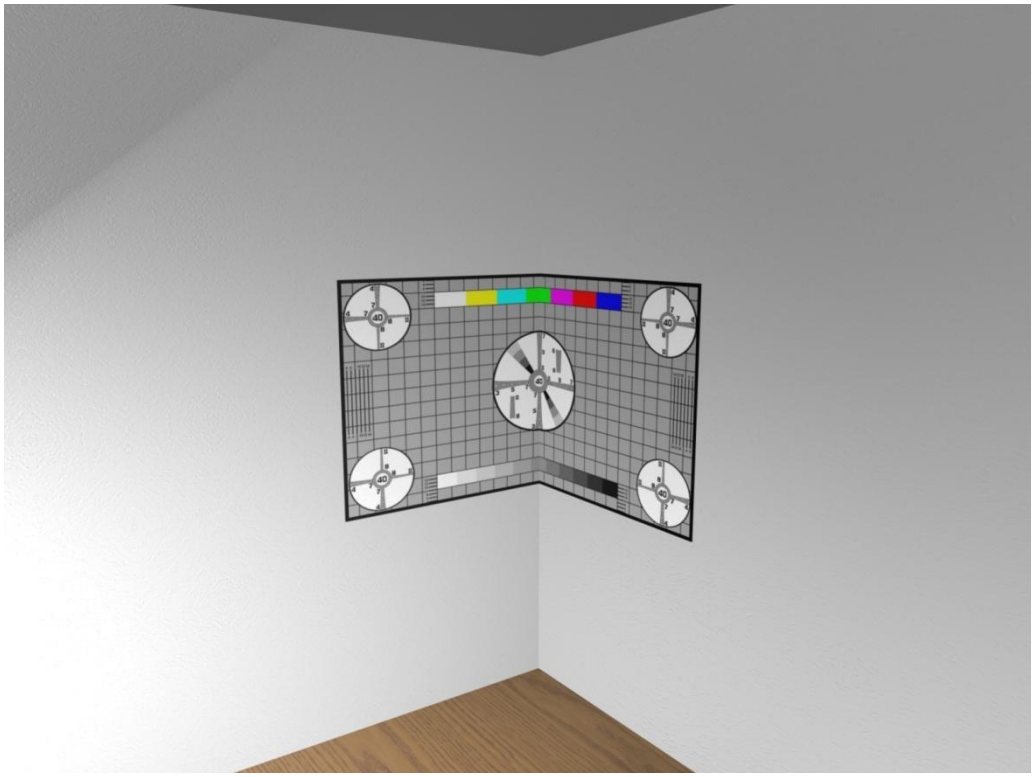

Abb. 3-21 Bezüglich der Geometrie kalibrierte Projektion aus Sicht der Kamera (Eckenprojektion).

Abb. 3-22 Bezüglich der Geometrie kalibrierte Projektion aus Sicht des Betrachters (Eckenprojektion).

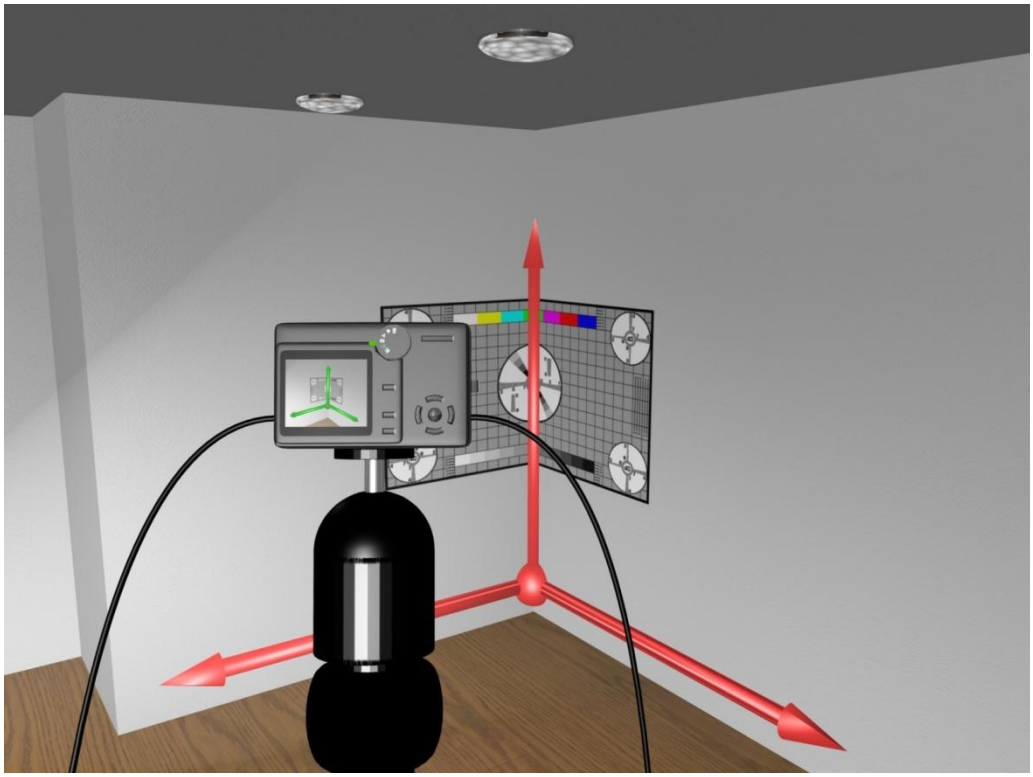

Abb. 3-23 Das lokale Referenzsystem ist gleich dem globalen Referenzsystem (Eckenprojektion).

3.2.3.1 Zusammenfassung

Anhand der in diesem Abschnitt erläuterten wahrnehmungspsychologischen Aspekte wird deutlich, dass Projektion und Projektionsfläche nicht unabhängig voneinander betrachtet werden können. Sie werden rein intuitiv zu Gruppen zusammengefasst.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass die Projektion parallel an horizontalen und vertikalen Strukturen ausgerichtet werden sollte. Dazu wurde das lokale und globale Referenzsystem eingeführt, sowie die Notwendigkeit aufgezeigt beide Referenzsysteme zur Erlangung einer betrachterunabhängigen Kalibrierung in Einklang zu bringen. Dies ist nötig, um eine Reizkollision[77] bei der Auswertung im visuellen Cortex zu verhindern. Diese Reizkollision – hier bedingt durch den Konflikt zwischen Projektion und physikalischer Projektionsfläche – führt dazu, dass die Projektion unterschwellig als nicht korrekt bzw. als unschön wahrgenommen wird.

Die von mir gewonnenen Erkenntnisse haben Einfluss auf die Entwicklung bzw. die Anwendung der nachfolgend beschriebenen Algorithmen:

- Wird der erste beschriebene Algorithmus verwendet (Kapitel 4.1.1), ist auf eine sorgfältige Platzierung und Orientierung der Kamera zu achten. Diese sollte nach Möglichkeit so ausgerichtet sein, dass das Sichtfenster der Kamera (lokales Referenzsystem) parallel zur Projektionsfläche (globales Referenzsystem) angeordnet ist. Verfahren 1 und 2 sollten nur für Projektionsflächen verwendet werden, die keine großen dreidimensionalen Verformungen aufweisen.
- Basierend auf den Erfahrungen bei der Entwicklung des ersten Algorithmus und den beschriebenen wahrnehmungspsychologischen Erkenntnissen, erfolgt die Kalibrierung beim zweiten und dritten Algorithmus (Kapitel 4.1.2 und 4.1.3) bezüglich eines globalen Referenzsystems (der Projektionsfläche selbst). Das dritte Verfahren kann für stark dreidimensional verformte Projektionsflächen eingesetzt werden.

[77] Ein anderes Beispiel für eine Reizkollision ist die Reisekrankheit. Dabei treffen zwei unterschiedliche Reize aufeinander. Die Füße signalisieren dem Wahrnehmungssystem keine oder wenig Bewegung, die Augen liefern eine diesem Reiz widersprechende Information. Daher kommt es im Gehirn zu einer Reizkollision, die zu Übelkeit führen kann (Guedry 1968; Peters 2009).

4 Algorithmen

Im Folgenden werden die Algorithmen zur automatischen Kalibrierung von Multiprojektorsystemen vorgestellt. Bei der Entwicklung dieser Algorithmen wurde besonderer Wert auf die Verwendung von unkalibrierten Komponenten (Projektoren, Digitalkamera) gelegt. Im Gegensatz zu anderen Verfahren (siehe auch Kapitel 2) sollte eine aufwändige Systemkalibrierung entfallen und, - auf zuvor erstellte 3D-Modelle bzw. eine mathematische Repräsentation der Projektionsfläche verzichtet werden. In die Entwicklung der Algorithmen sind zusätzliche technisch/physikalische sowie wahrnehmungspsychologische Randbedingungen eingeflossen (siehe Abb. 4-1).

In den folgenden Abschnitten werden drei Verfahren vorgestellt, die bezüglich:

- einer Kamera (AutoCalib)
- einer 2D-Projektionsfläche (AutoCalib2D) und
- einer 3D-Projektionsfläche[78] (AutoCalib3D)

automatisch kalibrieren.

Für das erste Verfahren wird keinerlei Vorwissen benötigt. Die Verfahren 2 und 3 benötigen lediglich triviales Vorwissen, und haben den Vorteil, dass die Projektion an die Form der Projektionsfläche angepasst wird, wodurch Betrachterunabhängigkeit erreicht wird.

Bei allen drei Verfahren muss die Projektionsfläche von einer Digitalkamera vollständig „gesehen“ werden. Bei den beiden letzten Verfahren muss die Projektionsfläche einen erkennbaren Rand besitzen. Dies kann eine farbliche oder eine geometrische Diskontinuität sein. Die Projektionsfläche muss durch äquivalente Vektoren[79] beschreibbar sein.

Diese Randbedingungen[80] treffen für viele praxisrelevante Projektionsflächen – wie freistehende abgewinkelte Projektionsflächen, Zylindersegmente aber auch für in einer Dimension verformte Wellen (siehe Abb. 1-1) – zu.

In den folgenden Abschnitten werden die drei Verfahren kurz vorgestellt (Details werden im Anhang – Kapitel 7 – beschrieben). Des Weiteren wird gezeigt, wie die Verfahren zu einer generalisierten Lösung verknüpft werden können. Die Beschreibung der Algorithmen erfolgt jeweils beispielhaft anhand einer Zweikanal-Projektion. Die Verfahren sind aber nicht auf diese Anzahl limitiert, sondern für beliebige Mehrkanal-Projektionen einsetzbar.

[78] Natürlich auch unter Verwendung einer Kamera.

[79] Vektoren mit gleicher Länge und Richtung. Die Vektoren unterscheiden sich nur durch eine Translation.

[80] Auch Constraints oder Eigenschaften der Projektionsfläche.

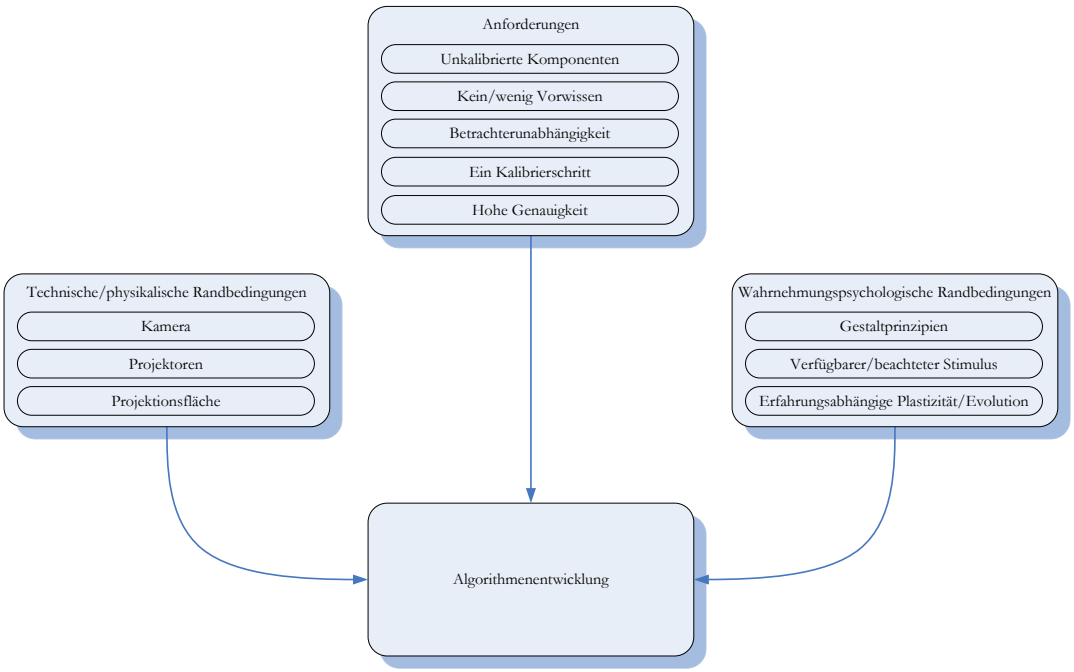

Abb. 4-1 Anforderungen an die Algorithmenentwicklung.

4.1.1 AutoCalib – Kamerabezogene 2D-Kalibrierung

4.1.1.1 Einleitung

Bei diesem Verfahren projiziert eine beliebige Anzahl von Projektoren auf eine Projektionsfläche, die nach Belieben verformt sein kann. Die Korrektur erfolgt bezüglich des Sichtfensters der Kamera (zweidimensionale Korrektur). Die Projektion wird im Gegensatz zum zweiten und dritten Verfahren (Kapitel 4.1.2 und 4.1.3) nicht an der Projektionsfläche „abgerollt".

In Abb. 4-2 ist eine unkalibrierte Projektion zu sehen, bei der zwei Projektoren stark überlappend auf die Projektionsfläche strahlen. Durch die Kalibrierung sollen beide Teilprojektionen zur Erhöhung der Leuchtstärke übereinandergelegt und bezüglich des Sichtfensters der Kamera ausgerichtet werden. Die Kalibrierung liefert eine homogene Projektion (s. Abb. 4-3). Die Teilprojektionen liegen pixelgenau übereinander, die Leuchtstärke ist höher als die eines einzelnen Projektors, und die Gesamtprojektion ist hinsichtlich des Kamerabildrandes ausgerichtet.

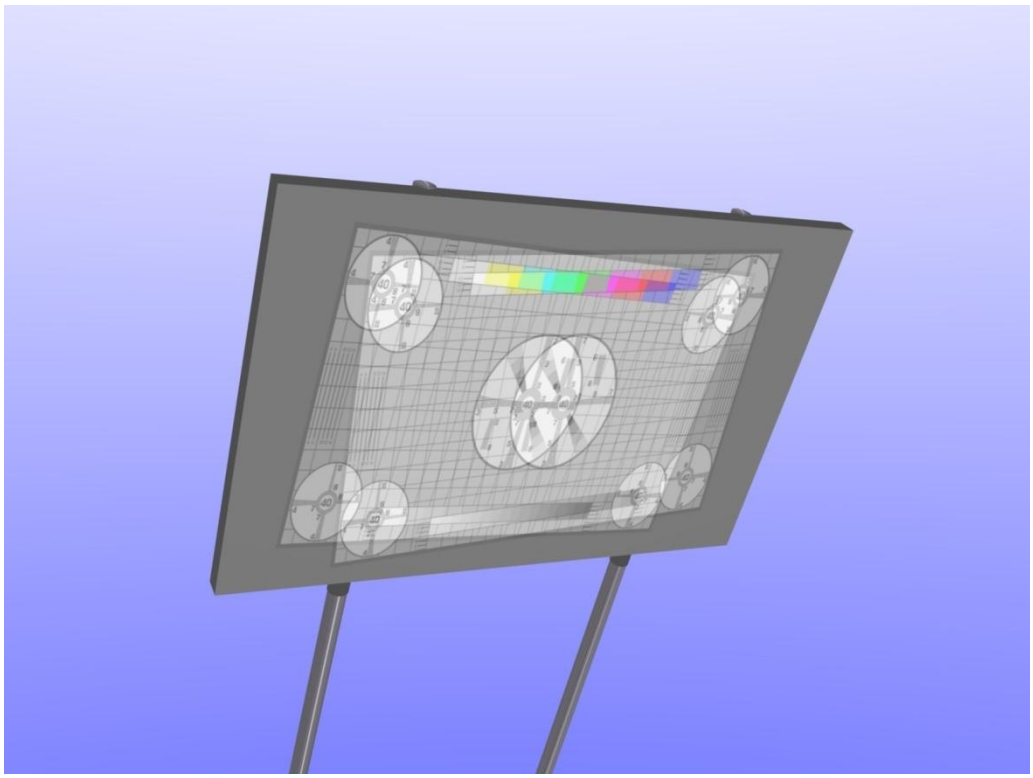

Abb. 4-2 Unkalibrierte Projektion.

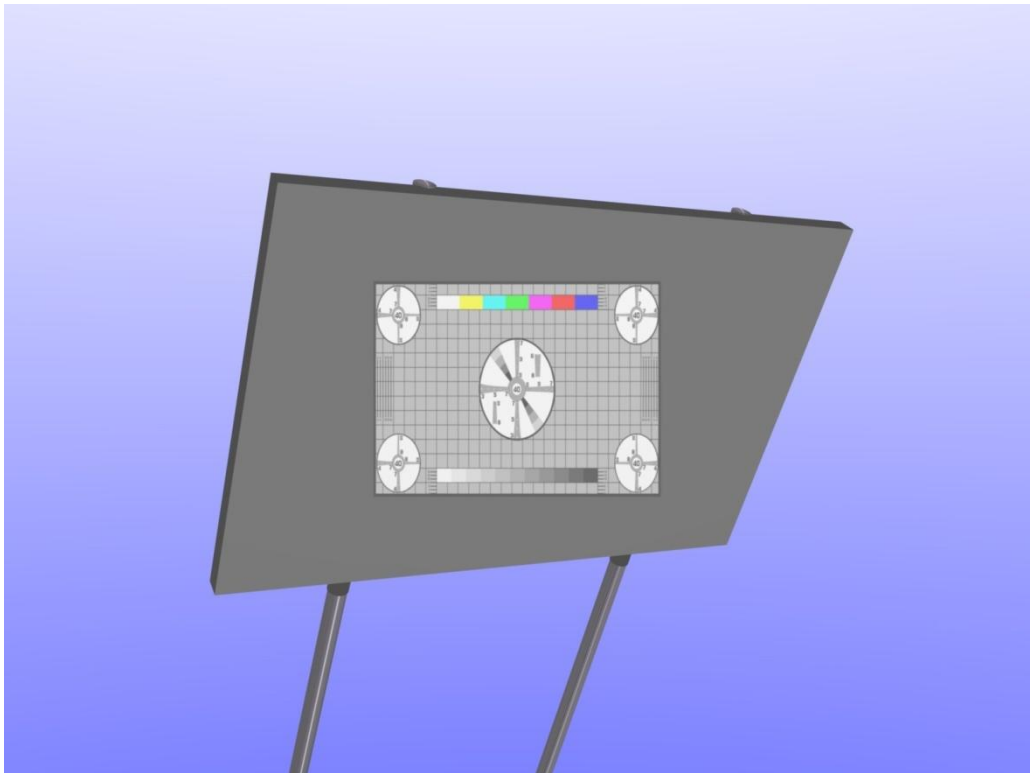

Abb. 4-3 Korrigierte Projektion.

4.1.1.2 Algorithmischer Überblick

Der schematische Ablauf des Algorithmus ist in Abb. 4-4 dargestellt.

Im ersten Schritt werden die Kalibriermuster dargestellt und fotografiert. Anschließend werden sie gefiltert. Aus diesen gefilterten Bildern werden die Schnittpunkte der zuvor projizierten Muster bestimmt. Innerhalb des Schnittpunktrasters wird die größtmögliche kalibrierte Projektionsfläche bestimmt. Im Anschluss werden uv-Koordinaten und Blendbilder berechnet, die bei der Echtzeitanwendung benötigt werden und dafür sorgen, dass die einzelnen Teilprojektionen eine homogene, kalibrierte Gesamtprojektion bilden.

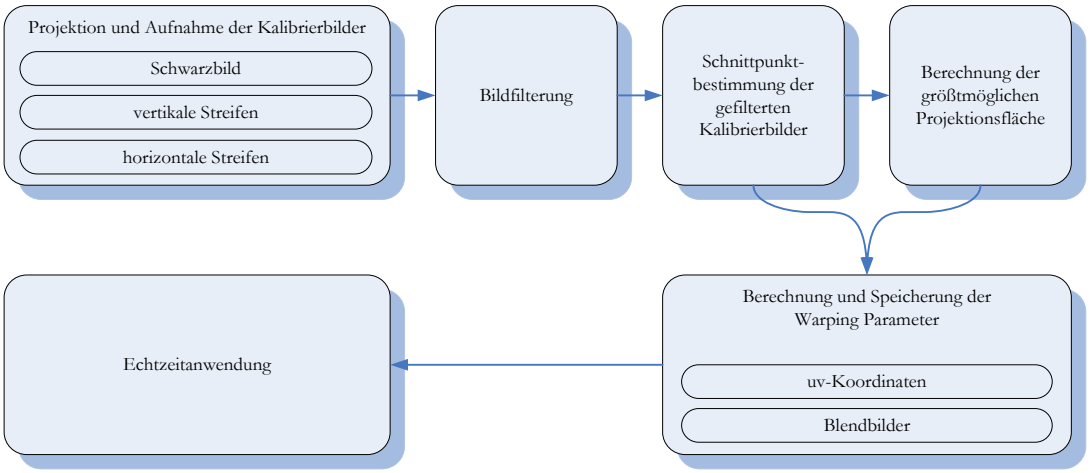

Abb. 4-4 Komponenten des Algorithmus.

4.1.1.3 Projektion und Aufnahme der Kalibrierbilder

Problembeschreibung: Um die Kalibrierung erfolgreich durchzuführen, muss in einem ersten Schritt bestimmt werden, wie die Projektoren zueinander und bezüglich dem für die Kalibrierung genutzten Referenzsystem (Kamera) ausgerichtet sind. Dies erfolgt mittels Projektion von Kalibrierstreifen, deren Lage im Projektorraum bekannt ist.

Vorbedingungen: Die Kamera muss den vollständigen Projektionsbereich „sehen". Um eine qualitativ hochwertige Kalibrierung zu gewährleisten, sollte die Kameraposition und -orientierung sorgfältig eingestellt werden (z. B. parallel zur Raumgeometrie). Die Position und Orientierung der Kamera darf sich während der Aufnahme der Kalibrierbilder nicht verändern.

Kurzbeschreibung: Zuerst projizieren alle Projektoren ein schwarzes Bild, welches mit der Kamera fotografiert wird (statisches Hintergrundbild). Anschließend werden von jedem Projektor nacheinander, dynamisch auf dem Rechencluster generierte, horizontale und vertikale Streifenbilder projiziert und mit der Kamera fotografiert.

Ergebnis dieser Schritte ist eine Abtastung der Projektionsfläche (Sampling). In den fotografierten Bildern lassen sich Abweichungen der Projektoren zueinander und zum Referenzsystem erkennen. Mit Hilfe des statischen Hintergrundbildes wird die Bildfilterung vereinfacht, da kalibrierstreifenähnliche Objekte, die sich außerhalb der Projektion befinden, per Subtraktion von der Filterung ausgeschlossen werden.

4.1.1.4 Filterung der Kalibrierbilder

Problembeschreibung: Nach Aufnahme der Kalibrierbilder erfolgt die Filterung. Für die anschließenden Schritte des Algorithmus wird eine euklidische Repräsentation jedes fotografierten Kalibrierstreifens benötigt, d.h. es wird ein Linienzug der Dicke Null gesucht, sodass dieser der Mittelachse des Kalibrierstreifens entspricht (Skelettierung). Die durch das Sampling mit einer Digitalkamera entstehenden Artefakte wie z. B. Aliasing, Farbverfälschungen, Zoom oder Vignetting, erschweren die Filterung und müssen somit auch berücksichtigt werden.

Vorbedingungen: Voraussetzung für diesen Schritt ist die Aufnahme sämtlicher Kalibrierbilder. Die Position der Kamera und ihre Einstellungen – insbesondere Zoom, Position und Orientierung – dürfen sich während der Aufnahmen nicht verändern.

Kurzbeschreibung: Im ersten Schritt der Filterung wird das Schwarzbild von den fotografierten Streifenbildern abgezogen (absolute Subtraktion). Durch diesen Schritt werden even-

tuell störende statische Hintergrundobjekte entfernt; im resultierenden Bild sind nur noch die zuvor projizierten Kalibrierstreifen sichtbar. Dies führt zu einer enormen Komplexitätsreduktion und erhöht die Qualität der Filterung. Mit einer mittels Histogramm automatisch bestimmten globalen Binärschwelle wird dieses Bild binarisiert, so dass nur noch schwarze und weiße Pixel im gefilterten Bild vorhanden sind. Kleinere Fehler werden mit der morphologischen Operation Closing korrigiert (Dilation gefolgt von Erosion). Um die Mittelachse der Streifen zu finden, werden – je nach Ausrichtung – für jeden Kalibrierstreifen der linke und rechte bzw. obere und untere Rand mit Hilfe vertikaler bzw. horizontaler Versatzfilter bestimmt. Die Mittelachse wird aus den jeweiligen beiden Rändern gemittelt.

Unter Umständen ist die Helligkeitsverteilung der fotografierten Kalibrierstreifen durch starkes Vignetting oder blickwinkelabhängige Projektionsflächen unregelmäßig, sodass eine globale Binärschwelle zu Fehlern in der Filterung führt. In diesem Fall kann ein gradientenbasiertes Konturverfolgungsverfahren eingesetzt werden.

4.1.1.5 Schnittpunktbestimmung der Kalibrierbilder

Problembeschreibung: Für die spätere Berechnung der uv-Koordinaten, die zur Entzerrung der unkalibrierten Projektionen benötigt werden, müssen die Schnittpunkte der Kalibrierstreifen auf der Projektionsfläche im Bildraum der Kamera bestimmt werden. Für das uv-Image-Warping werden vier Ziel- und vier Quellkoordinaten benötigt. Anhand der Schnittpunkte werden in einem späteren Schritt die Quellkoordinaten bestimmt. Um durch die Linsenverzerrung der Kamera verursachte Fehler in der kalibrierten Projektion zu vermeiden, müssen die Schnittpunkte korrigiert werden.

Vorbedingungen: Dieser Schritt setzt eine erfolgreiche Filterung der Kalibrierstreifen voraus. Diese können entweder jeweils durch ihre zwei Ränder bzw. durch ihre Mittelachse repräsentiert sein. Von den gefilterten Kalibrierstreifen auf der Projektionsfläche ist bekannt, welchem Streifen im Projektorraum sie zuzuordnen sind.

Kurzbeschreibung: Die Schnittpunkte der Kalibrierstreifen können entweder über ein Mittelungs- oder ein gradientenbasiertes Verfahren bestimmt werden.

Beim Mittelungsverfahren werden die Ränder der gefilterten horizontalen und vertikalen Kalibrierstreifen miteinander geschnitten. Der reale Schnittpunkt wird anhand der so entstehenden vier umschließenden Schnittpunkte bestimmt. Um eine möglicherweise durch die Platzierung der Projektionsfläche, Projektoren bzw. Kamera auftretende perspektivische Verzerrung zu korrigieren, erfolgt eine Homographie Transformation, bei der die vier um-

schließenden Schnittpunkte rektifiziert[81] werden. Die Bestimmung des realen Schnittpunktes ist dann trivial. Dieser Punkt muss allerdings noch in die ursprüngliche Ansicht rücktransformiert werden.

Beim gradientenbasierten Verfahren werden die Bilder der horizontalen und vertikalen Kalibrierstreifen miteinander multipliziert. Der Schnittpunkt entspricht dann jeweils den lokalen Maxima der Gradienten.

Im Anschluss an die Schnittpunktbestimmung erfolgt eine Korrektur der durch die radiale Linsenverzerrung der Kamera verursachten Effekte.

4.1.1.6 Bestimmung der größtmöglichen rechteckigen Projektionsfläche

Problembeschreibung: Um möglichst wenige Pixel zu „verlieren“[82], sollte die kalibrierte rechteckige Projektion so gut wie möglich in die unkalibrierten Teilprojektionen eingepasst werden. Dazu muss die größtmögliche Projektionsfläche gefunden werden. Dies kann die Einhüllende (größte umschließende Projektionsfläche), die Vereinigung (größte vereinigte Projektionsfläche) oder der Schnitt (größte gemeinsame Projektionsfläche) aller Teilprojektionen sein.

Vorbedingungen: Als Voraussetzung für diesen Schritt der Kalibrierung wird eine erfolgreiche Bestimmung der Schnittpunkte der gefilterten Kalibrierstreifen angenommen. Dies ist insbesondere für die Randbereiche aller Teilprojektionen relevant, da aus diesen der globale Rand bestimmt wird. Da die größtmögliche Projektionsfläche durch ein Rechteck – dessen Seiten parallel zum Kamerasichtfenster sind – beschrieben wird, ist eine möglichst optimale Platzierung der Kamera essentiell.

Kurzbeschreibung: Um die größtmögliche rechteckige Projektionsfläche zu bestimmen, werden zuerst die linsenentzerrten Randschnittpunkte aller Teilprojektoren ausgewählt. Aus diesen wird der globale Rand aller Teilprojektionen gebildet. Dies geschieht in Abhängigkeit der gewünschten bereits erwähnten Projektionsart (Einhüllende, Vereinigung, Schnitt). Die größtmögliche Projektionsfläche liegt innerhalb des globalen Randes und wird mit Hilfe eines geeigneten Optimierungsverfahrens gefunden.

4.1.1.7 Parameter für die Bildkorrektur

Problembeschreibung: Da die einzelnen Teilprojektionen verzerrt projiziert werden, müssen sie bezüglich der zuvor bestimmten größtmöglichen Projektionsfläche ausgerichtet wer-

[81] Transformation eines Vierecks in ein Rechteck (In diesem Fall unter Berücksichtigung der perspektivischen Verzerrung).

[82] Bei ungünstiger Platzierung der Projektoren befinden sich viele Pixel außerhalb der größtmöglichen rechteckigen Projektionsfläche. Diese Pixel können somit nicht mehr für die Darstellung von Bildinhalten genutzt werden.

den.

Durch die Einpassung in diese Referenzfläche erscheint die zuvor verzerrt wirkende Projektion nunmehr kalibriert. Für diese Korrektur müssen Entzerrungs-Parameter (uv-Koordinaten) bestimmt werden. Da überlappende Teilprojektionen eine zu große Helligkeit aufweisen, müssen des Weiteren Blending-Parameter (Blendbilder) für die einzelnen Teilprojektionen bestimmt werden.

Vorbedingungen: Dieser Schritt des Algorithmus setzt die erfolgreiche Bestimmung der Schnittpunkte der Kalibrierstreifen sowie die Bestimmung der größtmöglichen rechteckigen Projektionsfläche voraus. Diesem größten Rechteck sind uv-Textur-Koordinaten zugeordnet, wobei die linke untere Ecke der Koordinate (0.0, 0.0) und die rechte obere Ecke der Koordinate (1.0, 1.0) entspricht.

Kurzbeschreibung: Für alle Schnittpunkte der Kalibrierstreifen auf der Projektionsfläche ist bekannt, an welcher Position sich diese im Framebuffer der jeweiligen Teilprojektion befinden. Von den linear verteilten uv-Koordinaten ist wiederum bekannt, wo sie sich innerhalb der größtmöglichen rechteckigen Projektionsfläche befinden. Durch Zuordnung von unkalibrierten Schnittpunkten zu kalibrierten uv-Koordinaten wird bei der anschließenden Echtzeitanwendung (uv-Texture-Look-up siehe Kapitel 4.1.1.8) eine entzerrte Projektion erzeugt. Dabei wird jedem verzerrten Schnittpunkt eine uv-Position innerhalb der auf das Intervall $[0.0, 0.0] \times [1.0, 1.0]$ normalisierten größtmöglichen Projektionsfläche zugewiesen.

Bereiche verschiedener kalibrierter Teilprojektionen, die sich dieselben uv-Koordinaten teilen und somit innerhalb der Projektionsfläche überlappen, weisen eine höhere Helligkeit auf. Um dies zu korrigieren, müssen sogenannte Blendbilder erzeugt werden.

Anhand der Anordnung der Schnittpunkte bezüglich der größtmöglichen rechteckigen Projektionsfläche lässt sich bestimmen, welche Bereiche einer Teilprojektion überlappungsfrei sichtbar sind (weiß im Blendbild), welche außerhalb der Projektionsfläche liegen (schwarz im Blendbild) und wo sich Überlappungsbereiche der einzelnen Projektionen befinden (Graukeil im Blendbild). Die Summe der Intensität der Blendbilder muss an jeder Stelle der kalibrierten Projektion den Maximalwert Eins ergeben. Um einen sanften Übergang zwischen einzelnen Teilprojektionen zu gewährleisten, wird im Überlappungsbereich eine sigmoide Blendfunktion angewandt. Um das nichtlineare Verhalten der Projektoren (sogenannte Gamma-Kurve) zu korrigieren, muss die Blendfunktion noch mit dem inversen Gamma-Wert potenziert werden. Das so bestimmte globale Blendbild muss noch mit Hilfe der zuvor bestimmten Entzerrungs-Parameter in den jeweiligen Projektor-Bildraum transformiert werden.

Werden Entzerrungs- und Blending-Parameter auf sämtliche Teilprojektionen angewandt, wird eine homogene kalibrierte Projektion erzeugt.

4.1.1.8 Echtzeitanwendung

Problembeschreibung: Im letzten Schritt des Algorithmus erfolgt die Anwendung der zuvor bestimmten Daten (uv-Parameter und Blendbilder) auf vom Rechencluster erzeugte Bilder (Modifikation des gesamten Framebuffers). Diese Anwendung erfolgt im letzten Schritt der Rendering Loop und muss für bewegte Videobilder oder andere Echtzeit-Visualisierungen mit einer hohen Bildwiederholrate erfolgen. Echtzeitfähige Verfahren können beispielsweise für leistungsfähige Grafikkarten oder eingebettete Systeme (modifizierte Projektoren) entwickelt werden.

Vorbedingungen: Als Voraussetzung für diesen Schritt wird angenommen, dass sämtliche Schritte der bisherigen Kalibrierung erfolgreich verlaufen sind und das insbesondere die Ergebnisse des letzten Schrittes (uv-Parameter und Blendbilder) vorliegen. Für die Modifikation der Framebuffer-Inhalte in Echtzeit wird z. B. ein echtzeitfähiges Rendering-Cluster oder ein eingebettetes System[83] benötigt.

Kurzbeschreibung: Die Korrektur der einzelnen verzerrten Teilprojektionen erfolgt mittels Image-Warping. Dabei werden viereckige Quellbereiche aus einer uv-Textur[84] in rechteckige Zielbereiche im Projektor Framebuffer übertragen (uv-Texture-Look-up). Die Zielbereiche werden durch jeweils vier Schnittpunkte der Kalibrierstreifen definiert[85]. Die Quellbereiche sind durch die entsprechenden uv-Parameter definiert. Zielpixel denen keine uv-Koordinaten zugewiesen wurden, werden beim uv-Texture-Look-up interpoliert. Durch Anwendung des Image-Warpings sind die Teilprojektionen bezüglich der größtmöglichen Projektionsfläche ausgerichtet.

Um die zu hohe Helligkeit in den Überlappungsbereichen zu korrigieren, werden die Teilprojektionen im Anschluss mit den Blendbildern multipliziert. Durch diese Multiplikation werden die Farbwerte entweder nicht modifiziert[86], auf Schwarz gesetzt[87] oder entsprechend ihrer Position im Überlappungsbereich mehrerer Projektoren angepasst[88]. Als Ergebnis liegt eine homogene, entzerrte Gesamtprojektion vor.

---

[83] z. B. Bildverzerrungseinheit im Projektor.

[84] Das darzustellende gesamte Bild.

[85] Aktuell betrachteter Schnittpunkt sowie die drei Nachbarn (rechts, oben, rechts oben).

[86] 1 im Blendbild; entspricht den nicht überlappenden Bereichen in der gesamten Projektion.

[87] 0 im Blendbild; entspricht Bereichen außerhalb der größtmöglichen rechteckigen Projektionsfläche.

[88] Zwischen 0 und 1 im Blendbild; je dichter der Abstand eines Pixel einer Teilprojektion im Überlappungsbereich zu einer angrenzenden Teilprojektion ist, desto stärker wird dieser abgedunkelt. Die Gesamthelligkeit aller überlappenden Pixel muss 1 ergeben.

4.1.2 AutoCalib2D – Projektionsflächenbezogene 2D-Kalibrierung

4.1.2.1 Einleitung

Bei diesem Verfahren projiziert eine beliebige Anzahl von Projektoren auf eine planare, rechteckige Projektionsfläche. Alle bzw. einige Teilprojektoren strahlen dabei über den Rand der Projektionsfläche hinaus. Die Korrektur der Teilprojektionen erfolgt diesmal nicht bezüglich des Sichtfensters der Kamera. Die Projektionsfläche selbst dient als Referenzsystem[89]. Der Rand dieser Projektionsfläche kann entweder farblich gekennzeichnet sein und/oder über eine geometrische Diskontinuität erkennbar sein.

In Abb. 4-5 wird beispielhaft eine derartige unkalibrierte Projektion dargestellt. Im Beispiel strahlen zwei Projektoren leicht überlappend auf die Projektionsfläche. Beide Projektoren strahlen über den Rand der Projektionsfläche hinaus. Ziel der Kalibrieraufgabe ist es, die Bilder beider Projektoren zur Erhöhung der Auflösung an die Form der Projektionsfläche anzupassen.

Nach der Kalibrierung liegt die gewünschte Projektion vor (siehe Abb. 4-6). Die überlappenden Bereiche der Teilprojektionen liegen pixelgenau übereinander, die Gesamtprojektion ist an die Projektionsfläche angepasst, und der überlappende Bereich der Teilprojektionen weist eine homogene Helligkeit auf.

In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels werden die einzelnen Komponenten dieses Algorithmus näher beschrieben.

[89] Dieses rechteckige Referenzsystem kann aber auch manuell – beispielsweise per Laserpointer – auf einer klassischen Projektionsfläche definiert werden.

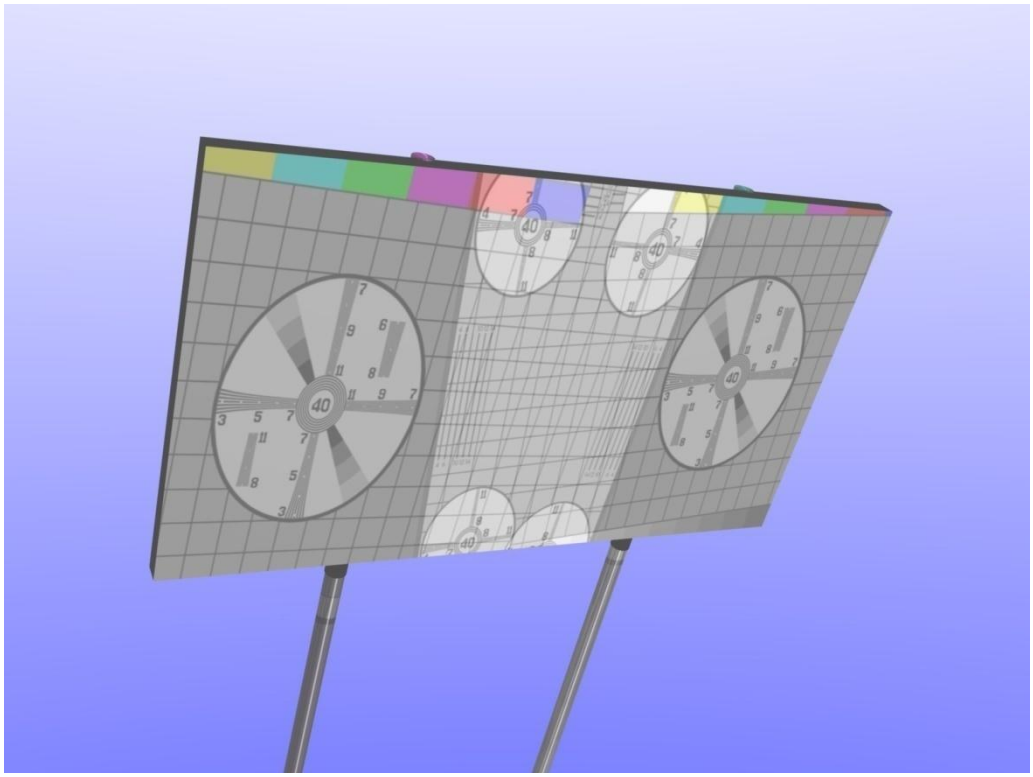

Abb. 4-5 Unkalibrierte Projektion.

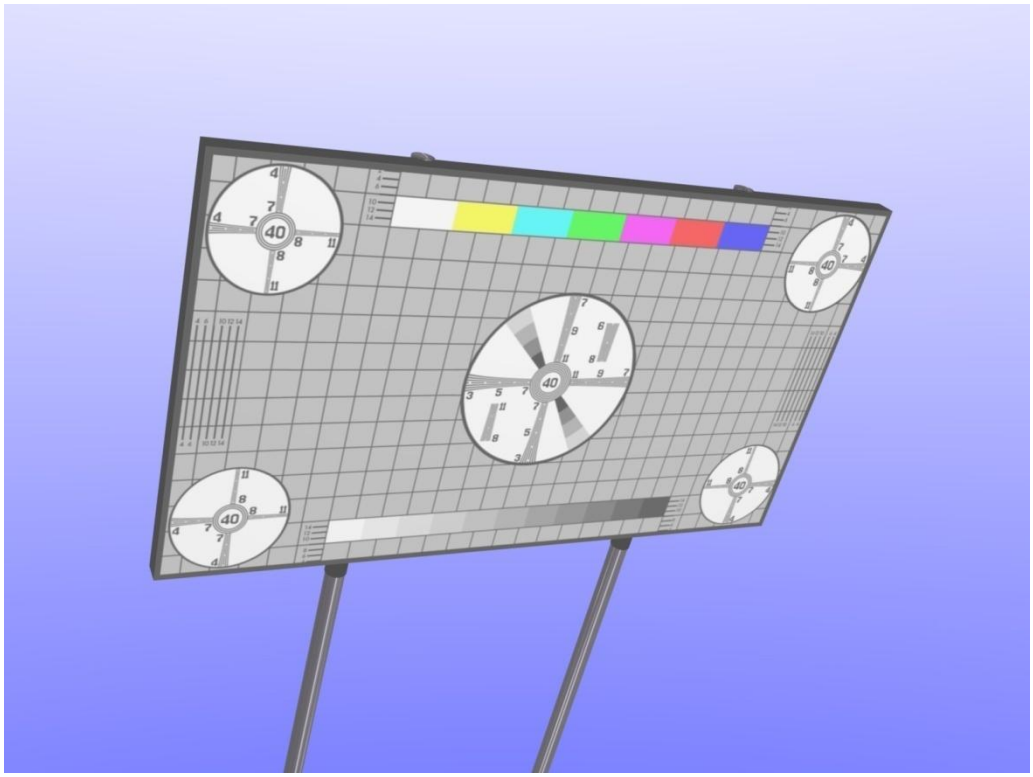

Abb. 4-6 Kalibrierte Projektion.

4.1.2.2 Algorithmischer Überblick

Der schematische Ablauf und die Komponenten dieses Algorithmus sind in Abb. 4-7 abgebildet.

Im ersten Schritt werden die Kalibriermuster dargestellt und fotografiert. Anschließend werden diese gefiltert. Anhand der gefilterten Daten werden die Parameter für eine ad-hoc-Linsenentzerrung berechnet. Mit Hilfe dieser Parameter und den gefilterten Daten werden die Eckpunkte der Projektionsfläche und die Schnittpunkte der zuvor projizierten Muster bestimmt. Zur einfacheren Berechnung der uv-Koordinaten und Blendbilder werden diese Punkte so transformiert, dass die zuvor im Bildraum der Kamera perspektivisch verzerrte Projektionsfläche als Rechteck vorliegt. Anschließend werden für jede Teilprojektion uv-Koordinaten und Blendbilder berechnet, die bei der Echtzeitanwendung zum Einsatz kommen und dafür sorgen, dass eine homogene, kalibrierte Gesamtprojektion erzeugt wird.

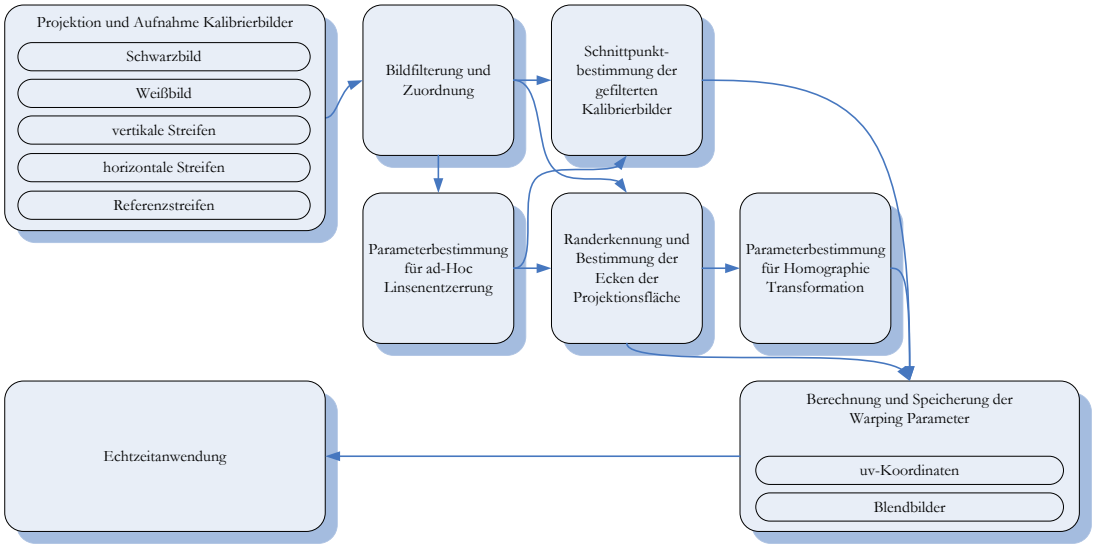

Abb. 4-7 Komponenten des Algorithmus.

4.1.2.3 Projektion und Aufnahme der Kalibrierbilder

Problembeschreibung: Wiederum muss in einem ersten Schritt erkannt werden, wie die Projektoren zueinander und in Bezug auf das Referenzsystem (rechteckige Projektionsfläche) ausgerichtet sind. Dazu werden erneut Kalibrierstreifen projiziert, von denen die Anordnung im Projektorraum bekannt ist.

Vorbedingungen: Die Kamera muss wiederum die vollständige Projektionsfläche „sehen“ und der Rand der Projektionsfläche muss von der Kamera erkennbar sein. Dies kann beispielsweise über eine farbliche Markierung, eine geometrische Diskontinuität oder aber auch über eine Markierung per Laserpointer erreicht werden. Ein Teil oder alle Projektoren strah-

len über diesen Rand hinaus; allerdings so, dass zuvor definierte Referenzstreifen für die Kamera immer noch sichtbar sind.

Die Projektion über den Rand hinaus ist notwendig, um diesen bei der anschließenden Bildfilterung eindeutig als solchen zu identifizieren, aber auch aus ästhetischen Gründen, um die vollständige Ausnutzung der physikalischen Projektionsfläche zu gewährleisten.

Im Unterschied zum vorherigen Verfahren muss die Positionierung der Kamera nicht sehr exakt erfolgen, da die Kalibrierung nicht bezüglich der Kamera sondern bezüglich der Projektionsfläche erfolgt. Die Kameraposition sollte insbesondere bei blickwinkelabhängigen Projektionsflächen (Silverscreen) nicht zu stark von der Idealposition[90] abweichen, da andernfalls eine gute Qualität bei der anschließenden Bildfilterung nicht mehr gewährleistet werden kann.

Kurzbeschreibung: Die Projektion und Aufnahme der Kalibrierbilder erfolgt analog zu der in den Kapiteln 4.1.1.3 und 7.1.1 beschriebenen Vorgehensweise. Zusätzlich zu den bereits erwähnten horizontalen und vertikalen Streifen werden pro Teilprojektion ein horizontaler und vertikaler Referenzstreifen projiziert. Dies ist nötig, da sich bei diesem Verfahren Teile der Projektion außerhalb der Projektionsfläche befinden können und somit unter Umständen nicht mehr sichtbar sind. Ist dies der Fall, ist nicht klar, an welchen Pixelpositionen die in den Aufnahmen sichtbaren projizierten Streifen im Projektorraum liegen, womit die Bestimmung des Zielbereichs beim Image-Warping fehlerhaft wäre. Mit Hilfe der Referenzstreifen kann wiederum erkannt werden, um welchen Kalibrierstreifen es sich in der Aufnahme handelt, da diese Referenzstreifen sichtbar sind und außerdem bekannt ist, an welcher Pixelposition sie sich im Projektorraum befinden. Der Referenzstreifen entspricht jeweils einem Streifen in den vertikalen bzw. horizontalen Kalibrierbildern.

Zur Erkennung des Randes der Projektionsfläche und zur Eingrenzung der ROI[91] für die nachfolgenden Schritte des Algorithmus wird ein globales Weißbild projiziert.

4.1.2.4 Filterung der Kalibrierbilder

Problembeschreibung: Im Anschluss an die Aufnahme der Kalibrierbilder werden diese gefiltert. Dabei ist zu beachten, dass für eine korrekte Zuordnung der gefilterten Streifen die Referenzstreifen zu Hilfe gezogen werden.

Vorbedingungen: Es müssen dieselben Bedingungen wie in Kapitel 4.1.1.4 beschrieben, erfüllt sein. Zusätzlich muss bekannt sein, welchen projizierten Streifen die Referenzstreifen entsprechen.

[90] Orthogonal zur Projektionsfläche.

[91] Region of Interest, Region von Interesse.

Kurzbeschreibung: Die Filterung der Kalibrierbilder erfolgt im Wesentlichen analog zu dem in den Kapiteln 4.1.1.4 und 7.1.2 beschriebenen Verfahren. Aufgrund der durch ihre physikalische Form definierten Projektionsfläche und den somit vorhandenen Rand, weist das Verfahren allerdings einige Unterschiede auf (siehe Kapitel 4.1.2.5, 4.1.2.6 und 4.1.2.7).

Da einige Kalibrierstreifen bei diesem Verfahren außerhalb der Projektionsfläche liegen und nicht bekannt ist, welche Streifen auf der Projektionsfläche sichtbar sind, werden für die korrekte Referenzierung die Referenzstreifen genutzt.

4.1.2.5 Ad-hoc Linsenentzerrung

Problembeschreibung: Um Fehler in der kalibrierten Projektion zu vermeiden, muss die Linsenverzerrung der Kamera korrigiert werden. Andernfalls würde die inverse Verzerrung in der kalibrierten Projektion auftreten. Im Gegensatz zu dem in den Kapiteln 4.1.1 und 7.1 beschriebenen Verfahren ist es bei diesem Verfahren möglich, die Parameter für die Linsenentzerrung anhand der geraden Kanten der Projektionsfläche zu bestimmen. Ein spezieller Kalibrierkörper, wie beispielsweise von Tsai (1986) beschrieben, wird nicht benötigt. Es handelt sich somit um eine ad-hoc-Linsenentzerrung.

Vorbedingungen: Die Projektionsfläche muss gerade Kanten aufweisen. Diese muss anhand einer farblichen oder geometrischen Diskontinuität im Kamerabild gut erkennbar sein. Ein Teil der Kalibrierstreifen muss die Kanten schneiden, so dass diese Schnittpunkte in den Kalibrierbildern erkennbar sind.

Kurzbeschreibung: Die geraden Strukturen der Projektionsfläche (die Ränder) müssten bei einer Kamera, die keine Linsenverzerrung aufweist, in geraden Strukturen im Kamerabild resultieren. Weisen diese allerdings Verzerrungen auf, können die Entzerrungsparameter analog zu den in den Kapiteln 4.1.1.5 und 7.1.3.2 beschriebenen Verfahren bestimmt werden[92]. Die zu entzerrenden Eingabeparameter sind die Schnittpunkte der vertikalen und horizontalen Kalibrierstreifen mit dem Rand der Projektionsfläche.

Alternative Verfahren zur ad-hoc-Linsenentzerrung (Thormählen, 2005) treffen ebenso Annahmen über im Bild vorhandene gerade Strukturen. Sie sind allerdings fehleranfälliger als die hier vorgestellte Lösung, da die Annahmen bereits fehlerbehaftet sein können.

[92] Es kann allerdings auch auf die ad-hoc Linsenentzerrung verzichtet werden und das zuvor beschriebene Verfahren eingesetzt werden. Allerdings muss dann die Parameterbestimmung bei jedem Wechsel des Kameramodells neu erfolgen. Wird dies vergessen, erfolgt die Entzerrung mit falschen Parametern, was unter Umständen zu noch stärkeren Verzerrungen führen kann.

4.1.2.6 Rand- und Eckenerkennung der Projektionsfläche

Problembeschreibung: Für die in einem späteren Schritt des Algorithmus durchgeführte Homographie Transformation werden vier Quell- und Zielkoordinaten benötigt. Die Quellkoordinaten entsprechen den Ecken der Projektionsfläche.

Vorbedingungen: Die verwendete Projektionsfläche muss rechteckig sein. Das projizierte Gesamt-Weißbild muss über die Projektionsfläche hinausstrahlen, so dass die Ecken erkennbar sind.

Kurzbeschreibung: Anhand des projizierten Weißbildes, von dem nach Subtraktion des Schwarzbildes angenommen werden kann, dass es die größte helle Struktur im Kamerabild ist, können der Rand und die Ecken der Projektionsfläche sowie die ROI für die Filterung der Kalibrierstreifen bestimmt werden. Die über die Projektionsfläche hinausgehenden Bereiche des Weißbildes können ausgeschlossen werden. Die Unterscheidung zwischen inneren und äußeren Bereichen ist aufgrund der bereits erwähnten Erkennbarkeit des Randes der Projektionsfläche möglich. Die Filterung des Weißbildes erfolgt über einen Schwellenwertfilter. Der Bereich der Projektionsfläche ist nunmehr durch eine weiße Maske definiert. Anhand dieser Maske können der linke, rechte, obere und untere Rand sowie die vier Eckpunkte der Projektionsfläche bestimmt werden. Die Erkennung der Ränder erfolgt wiederum über horizontale bzw. vertikale Versatzfilter. Die Ecken werden aus den Start- bzw. Endpunkten aneinander grenzender Randsegmente gemittelt.

4.1.2.7 Homographie-Transformation

Problembeschreibung: Zur Erleichterung der Parameterbestimmung für die Bildkorrektur (siehe Kapitel 4.1.2.9) wird bei diesem Verfahren die Projektionsfläche mit Hilfe einer Homographie Transformation (siehe Kapitel 4.1.1.5 und 7.1.3.1) in eine rechteckige Fläche transformiert. Ist dies geschehen, können die uv-Koordinaten anhand der transformierten Ecken wieder linear bestimmt werden[93].

Vorbedingungen: Es müssen die gefilterten Eckpunkte (Quellkoordinaten) der Projektionsfläche vorliegen.

[93] Die Homographie-Transformation wird nur als Hilfsmittel für die Kalibrierung verwendet und nicht zur eigentlichen Kalibrierung. Dies ist einerseits darin begründet, dass die Projektionsfläche nicht perfekt sein muss und andererseits diese Transformationen Fehler aufweisen, die insbesondere bei gestackten Projektionen zu unschönen Artefakten führen. Fehler innerhalb der Projektionsfläche werden durch das Image-Warping korrigiert.

Kurzbeschreibung: Die Quellkoordinaten für diese Transformation (Ecken der Projektionsfläche), werden zuvor der Linsenentzerrung unterworfen. Die Zielkoordinaten sind durch das Quadrat (0.0, 0.0, 1.0, 1.0) definiert. Anhand der Quell- und Zielkoordinaten wird wiederum eine Homographie Matrix analog des im Kapitel 7.1.3.1 beschriebenen Verfahrens bestimmt.

4.1.2.8 Schnittpunktbestimmung der Kalibrierbilder

Problembeschreibung: Die Schnittpunktbestimmung erfolgt analog zu dem in den Kapiteln 4.1.1.5 und 7.1.3 beschriebenen Verfahren. Neben den Schnittpunkten innerhalb der Projektionsfläche müssen noch weitere Schnittpunkte außerhalb der Projektionsfläche extrapoliert werden (virtuelle Vergrößerung der Projektionsfläche). Dies ist notwendig, um sämtliche Zielbereiche für den uv-Texture-Look-up vorliegen zu haben und somit auch eine kalibrierte Projektion in den Randbereichen der Projektionsfläche zu ermöglichen.

Vorbedingungen: Voraussetzung für diesen Schritt des Algorithmus ist die erfolgreiche Filterung der Kalibrierstreifen und die Bestimmung der Parameter für die ad-hoc Linsenentzerrung.

Kurzbeschreibung: Zur Bestimmung der Schnittpunkte werden wie zuvor beschrieben die gefilterten Kalibrierstreifen miteinander geschnitten. Diese Punkte werden mit Hilfe der Parameter für die ad-hoc Linsenentzerrung von der durch die Kamera verursachten radialen Verzerrung „befreit“. Ergebnis dieses Schrittes sind die korrigierten Schnittpunkte innerhalb der Projektionsfläche.

Wie erwähnt, müssen für eine vollständig kalibrierte Projektionsfläche weitere Schnittpunkte außerhalb der Projektionsfläche bestimmt werden. Diese Schnittpunkte werden anhand der bereits gefundenen Schnittpunkte so lange extrapoliert, bis die Projektionsfläche vollständig von einem extrapolierten Schnittpunktrand umhüllt ist.

4.1.2.9 Parameter für die Bildkorrektur

Problembeschreibung: Im Vergleich zum ersten beschriebenen Verfahren wird bei diesem Algorithmus die größtmögliche Projektionsfläche nicht durch ein Rechteck im Kamerabild beschrieben (siehe Kapitel 4.1.1.6 und 7.1.4). Bei dem hier vorgestellten Verfahren entspricht der physikalische rechteckige Rand der Projektionsfläche der größtmöglichen Projektionsfläche, in welche die Bildinhalte eingepasst werden sollen. Es werden wiederum Warping- und Blending-Parameter bestimmt.

Aufgrund der unbekannten Relation von Kamera und Projektionsfläche weisen die Aufnahmen der Kalibrierbilder unter Umständen eine perspektivische Verzerrung auf. Die eigentlich rechteckige Projektionsfläche wird (nach erfolgter Linsenentzerrung) im Kamerabild lediglich als Viereck abgebildet. Somit können die uv-Werte der Schnittpunkte der Kalib-

rierstreifen vorerst nicht anhand der Formel 7-44 bestimmt werden, da diese von einer rechteckigen Projektionsfläche ausgeht.

Vorbedingungen: Zur Bestimmung der Bildkorrektur Parameter werden die gefilterten, korrigierten Schnittpunkte der Kalibrierstreifen sowie die Homographie Matrix benötigt.

Kurzbeschreibung: Die Korrektur der perspektivischen Verzerrung erfolgt mit Hilfe einer Homographie-Transformation. Mit Hilfe der im Kapitel 4.1.2.7 bestimmten Matrix werden die Schnittpunkte der Kalibrierstreifen sowie der Rand der Projektionsfläche derart transformiert, dass die transformierte Darstellung der Projektionsfläche einem Rechteck entspricht. Danach können die uv-Parameter und Blendbilder analog dem Verfahren aus Kapitel 4.1.1.7 bzw. 7.1.5 bestimmt werden.

Nach der Bestimmung der Bildkorrektur-Parameter für alle Projektoren können diese in Echtzeit zur Erzeugung einer kalibrierten Mehrkanalprojektion eingesetzt werden.

4.1.3 AutoCalib3D – Projektionsflächenbezogene 3D-Kalibrierung

4.1.3.1 Einleitung

Das letzte in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren ist eine Erweiterung des in Kapitel 4.1.2 beschriebenen Algorithmus. Eine beliebige Anzahl von Projektoren projiziert auf eine dreidimensional verformte Projektionsfläche. Wiederum strahlen alle oder einige Teilprojektionen über den Rand der Projektionsfläche hinaus. Als Referenzsystem für die Kalibrierung dient wiederum die Projektionsfläche selbst, die folgende Randbedingungen (Constraints) erfüllen muss:

- Die Projektionsfläche ist durch äquivalente Vektoren, die senkrecht auf einer Ebene stehen, beschreibbar.
- Die Projektionsfläche muss eine 3D-Tiefe aufweisen.

Diese Randbedingungen gelten sowohl für horizontal als auch vertikal ausgerichtete Projektionsflächen. In Abb. 4-8 wird eine diese Randbedingungen erfüllende Projektionsfläche mit zwei unkalibrierten Projektoren dargestellt. Das Ziel ist es wiederum, die Teilprojektionen so an die Form der Projektionsfläche und zueinander anzupassen, dass eine kalibrierte Gesamtprojektion vorliegt (siehe Abb. 4-9). In den folgenden Abschnitten werden die Komponenten dieses Algorithmus erläutert.

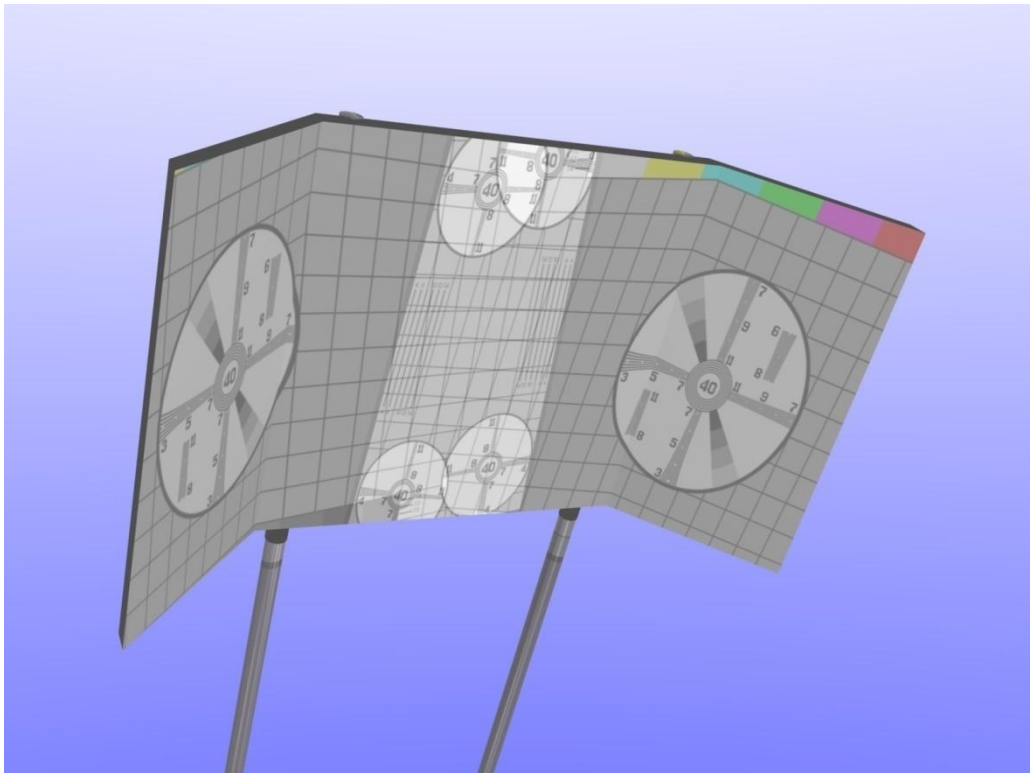

Abb. 4-8 Unkalibrierte Projektion.

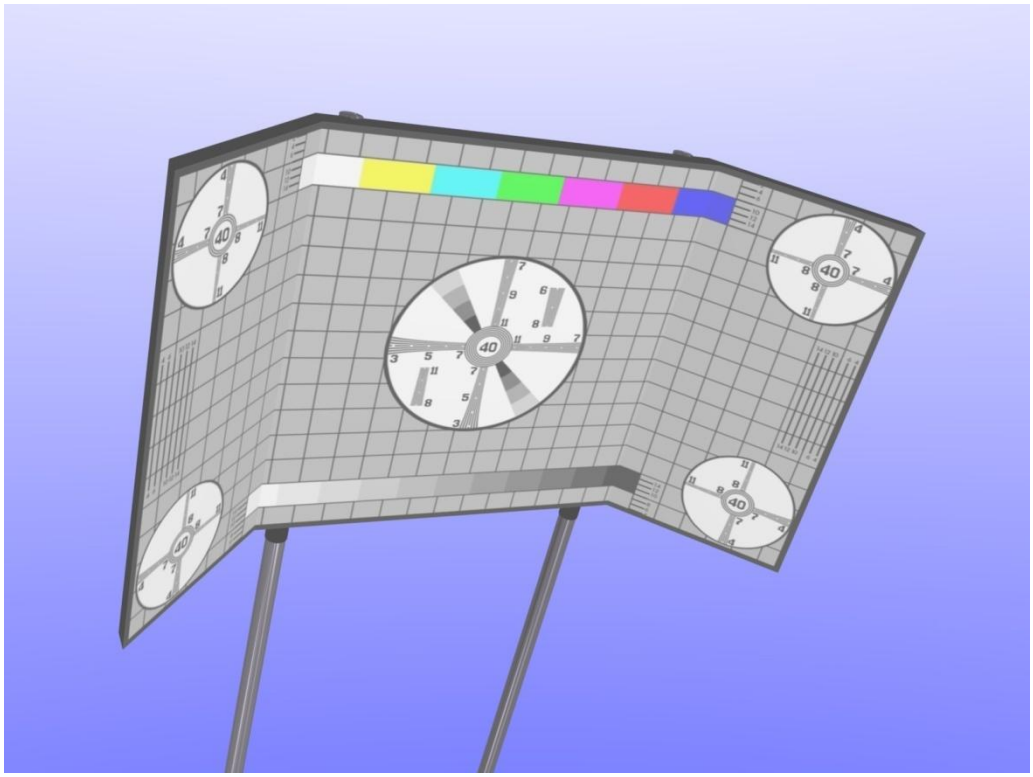

Abb. 4-9 Kalibrierte Projektion.

4.1.3.2 Algorithmischer Überblick

Die Komponenten und der Ablauf des Algorithmus sind in Abb. 4-10 dargestellt.

Im ersten Schritt erfolgen die Projektion und die Aufnahme der Kalibrierbilder, danach werden sie in einem zweiten Schritt gefiltert. Mit Hilfe der gefilterten Daten werden die Parameter für die ad-hoc Linsenentzerrung bestimmt. Anhand dieser Parameter und der gefilterten Daten werden die Eckpunkte und der Rand der Projektionsfläche bestimmt. Die Eckpunkte werden in einem weiteren Schritt zur Bestimmung einer Transformationsmatrix (Homographie-Matrix) benutzt, mit der der gefilterte Rand der Projektionsfläche so transformiert wird, dass im transformierten Rand korrespondierende Punkte bestimmt werden können. Diese werden in einem weiteren Schritt rücktransformiert, so dass diese korrespondierenden Punkte auch im untransformierten Bild der Projektionsfläche vorliegen. Anhand dieser rücktransformierten Randpunkte wird ein 3D-Modell der Projektionsfläche erzeugt. Im Anschluss werden die Schnittpunkte der zuvor projizierten Kalibrierstreifen in der zweidimensionalen Abbildung der Projektionsfläche (Fotos) und im rekonstruierten 3D-Modell bestimmt. Für jede Teilprojektion werden im Anschluss uv-Koordinaten und Blendbilder berechnet. Die Echtzeitanwendung dieser Parameter sorgt für eine homogene, kalibrierte Gesamtprojektion.

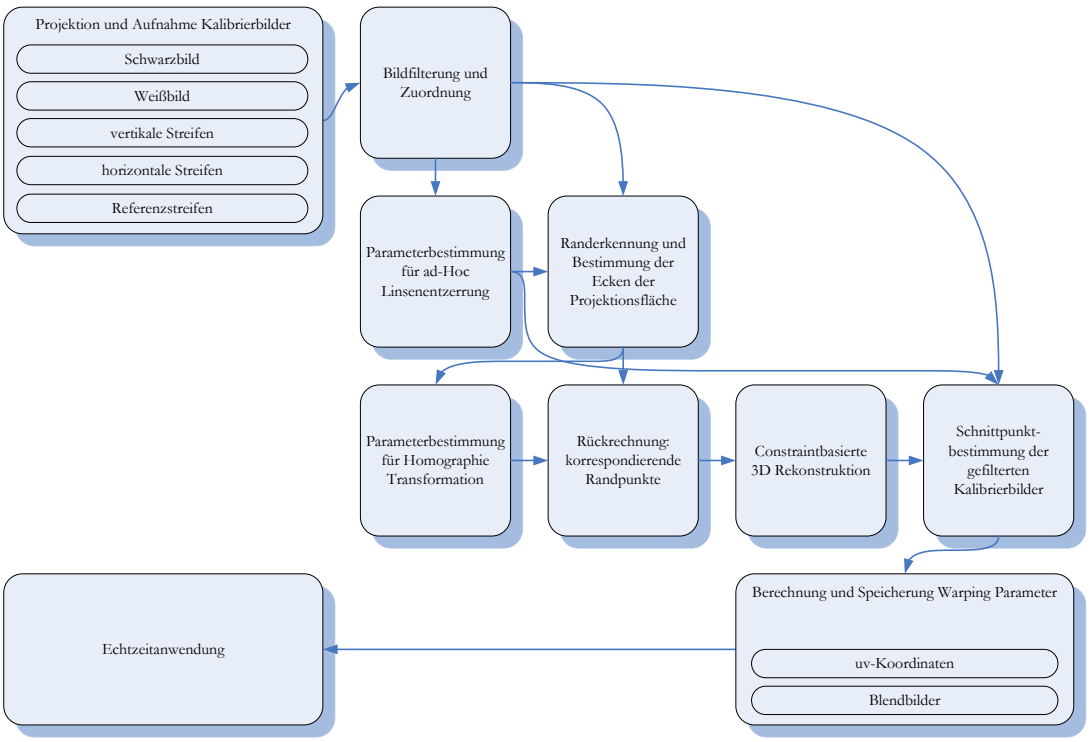

Abb. 4-10 Komponenten des Algorithmus.

4.1.3.3 Projektion und Aufnahme der Kalibrierbilder

Problembeschreibung: Im ersten Schritt muss wiederum erkannt werden, wie die Projektoren zueinander und bezüglich des Referenzsystems (dreidimensional verformte Projektionsfläche) ausgerichtet sind. Dazu werden Kalibrierstreifen projiziert, von denen die Anordnung im Projektorraum bekannt ist.

Vorbedingungen: Die Vorbedingungen entsprechen denen des zweiten vorgestellten Verfahrens (AutoCalib2D).

Kurzbeschreibung: Die Projektion und Aufnahme der Kalibrierbilder erfolgt analog zu der im Kapitel 4.1.2.3 beschriebenen Vorgehensweise.

4.1.3.4 Filterung der Kalibrierbilder

Problembeschreibung: Im Anschluss an die Aufnahme der Kalibrierbilder werden diese gefiltert.

Vorbedingungen: Es müssen dieselben Bedingungen wie in Kapitel 4.1.2.4 beschrieben, erfüllt sein.

Kurzbeschreibung: Die Filterung der Kalibrierbilder erfolgt im Wesentlichen wie im Kapitel 4.1.2.4 beschrieben. Im Unterschied zum zweiten Verfahren kann es bei diesem Verfahren aufgrund der Form der Projektionsfläche allerdings vorkommen, dass Kalibrierstreifen aus mehreren Segmenten bestehen. In Abb. 7-75 verlässt beispielsweise der oberste Kalibrierstreifen den oberen Rand der Projektionsfläche und tritt wiederum in diesen ein. Um eine korrekte Kalibrierung zu erreichen, müssen diese beiden Streifensegmente als zusammengehörig markiert werden und nicht als zwei unabhängige Kalibrierstreifen interpretiert werden, da ansonsten aufgrund der fehlerhaften Zuordnung einem der Streifen eine fehlerhafte Position im Projektorraum zugeordnet wird und somit auch die kalibrierte Projektion Fehler aufweist.

Die einfachste Lösung für dieses Problem ist es, nur gefilterte Kalibrierstreifen zu speichern, die die Projektionsfläche nicht entgegengesetzt ihrer Hauptrichtung verlassen. Das heißt horizontale Kalibrierstreifen dürfen die Projektionsfläche nicht oben oder unten, vertikale Kalibrierstreifen dürfen sie nicht links oder rechts verlassen. Ein Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass bei der anschließenden Schnittpunktbestimmung (siehe Kapitel 4.1.3.9) viele Schnittpunkte extrapoliert werden müssen.

Eine weitere Möglichkeit ist es, von Kalibrierstreifen, die aus mehreren Segmenten bestehen, nur das längste Segment zu speichern. Kurze Segmente werden damit ignoriert.

Die letzte – zu bevorzugende – Lösung ist, dass ein gefilterter Kalibrierstreifen aus mehreren Kalibrierstreifen-Segmenten bestehen kann. Hierbei (und auch beim vorherigen Lösungsansatz) muss allerdings sichergestellt werden, dass diese Segmente auch zum selben Kalibrierstreifen gehören. Dazu wird vom letzten durchgehenden Streifen ausgehend die Anzahl der austretenden und eintretenden Streifen gezählt. Sind nur austretende bzw. eintretende Streifen vorhanden, besteht der Kalibrierstreifen lediglich aus einem Segment. Sind mehrere austretende und eintretende Segmente vorhanden, wird über ihre räumliche Anordnung zum letzten durchgehenden Streifen entschieden, welche Segmente zueinander gehören.

4.1.3.5 Parameterbestimmung für ad-hoc Linsenentzerrung

Problembeschreibung: Die Linsenverzerrung der Kamera soll auch bei diesem Verfahren anhand der durch gerade Kanten begrenzten Projektionsfläche korrigiert werden.

Vorbedingungen: Die Projektionsfläche muss wiederum gerade Kanten aufweisen, die von einem Teil der Kalibrierstreifen geschnitten werden. Im Unterschied zum in Kapitel 4.1.2.5 beschriebenen Verfahren, müssen hier lediglich zwei Kanten gerade sein (je nach Ausrichtung der Projektionsfläche: linker und rechter bzw. oberer und unterer Rand).

Kurzbeschreibung: Die Bestimmung der Parameter erfolgt analog des im Kapitel 4.1.2.5 beschriebenen Verfahrens.

4.1.3.6 Rand- und Eckenerkennung der Projektionsfläche

Problembeschreibung: Für die in einem späteren Schritt des Algorithmus durchgeführte Homographie Transformation werden vier Quell- und Zielkoordinaten benötigt. Die Quellkoordinaten entsprechen wiederum den vier Ecken der Projektionsfläche.

Vorbedingungen: Die Vorbedingungen entsprechen denen des zweiten vorgestellten Verfahrens.

Kurzbeschreibung: Die Erkennung des Randes und der Ecken der Projektionsfläche wird für die nachfolgende Bestimmung der Homographie-Transformationsmatrix benötigt und erfolgt analog zu der im Kapitel 4.1.2.6 beschriebenen Vorgehensweise.

4.1.3.7 Homographie-Transformation und Rücktransformation der korrespondierenden Randpunkte

Problembeschreibung: Für die 3D-Rekonstruktion der Projektionsfläche werden korrespondierende Randpunkte benötigt. Dies sind Punktepaare, bei denen ein Punkt auf dem oberen und der andere Punkt auf dem unteren Rand liegt und bei denen beide Punkte je-

weils denselben Abstand zum linken bzw. rechten Rand der Projektionsfläche aufweisen[94] (siehe Abb. 4-11). Aufgrund des unbekannten Kamerastandortes und der damit verbundenen perspektivischen Transformation der Projektionsfläche im Kameraraum können die korrespondierenden Randpunkte nicht ohne weiteres im Kameraraum bestimmt werden. Daher muss wiederum eine Homographie-Transformation durchgeführt werden (siehe Kapitel 4.1.2.7).

Vorbedingungen: Es müssen die gefilterten Eckpunkte (Quellkoordinaten) der Projektionsfläche vorliegen.

Kurzbeschreibung: Die linsenverzerrten Quellkoordinaten zur Bestimmung der Transformationsmatrix (Ecken der Projektionsfläche) werden entzerrt. Die Zielkoordinaten werden wiederum durch das Quadrat (0.0, 0.0, 1.0, 1.0) definiert. Anhand der Quell- und Zielkoordinaten kann nun eine Homographie Matrix analog des im Kapitel 7.1.3.1 beschriebenen Verfahrens bestimmt werden.

Wird diese Transformation auf die korrespondierenden Randpunkte angewendet, liegen sich diese gegenüber. Im Beispiel in Abb. 4-12 sind Punkte, die sich auf dem oberen bzw. unteren Rand befinden und denselben x-Wert aufweisen, korrespondierend. Diese Punkte können nun paarweise ausgewählt werden. Für die anschließende 3D-Rekonstruktion werden alle oder lediglich spezielle Randpunkte (beispielsweise an Diskontinuitäten) ausgewählt.

Für den Initialschritt der 3D-Rekonstruktion wird zusätzlich das korrespondierende Paar mit dem größten z-Abstand zur Ebene, die der linke und rechte Rand aufspannt, bestimmt. Anschließend erfolgt die Rücktransformation dieser Punkte in das originale Kamerabild, da die untransformierten korrespondierenden Randpunkte zur 3D-Rekonstruktion benötigt werden. Dazu wird wiederum die inverse Homographie-Matrix bestimmt und auf die transformierten korrespondierenden Punkte angewandt.

[94] Bzw. Punkte, die auf dem linken und rechten Rand liegen und jeweils denselben Abstand zum oberen und unteren Rand aufweisen.

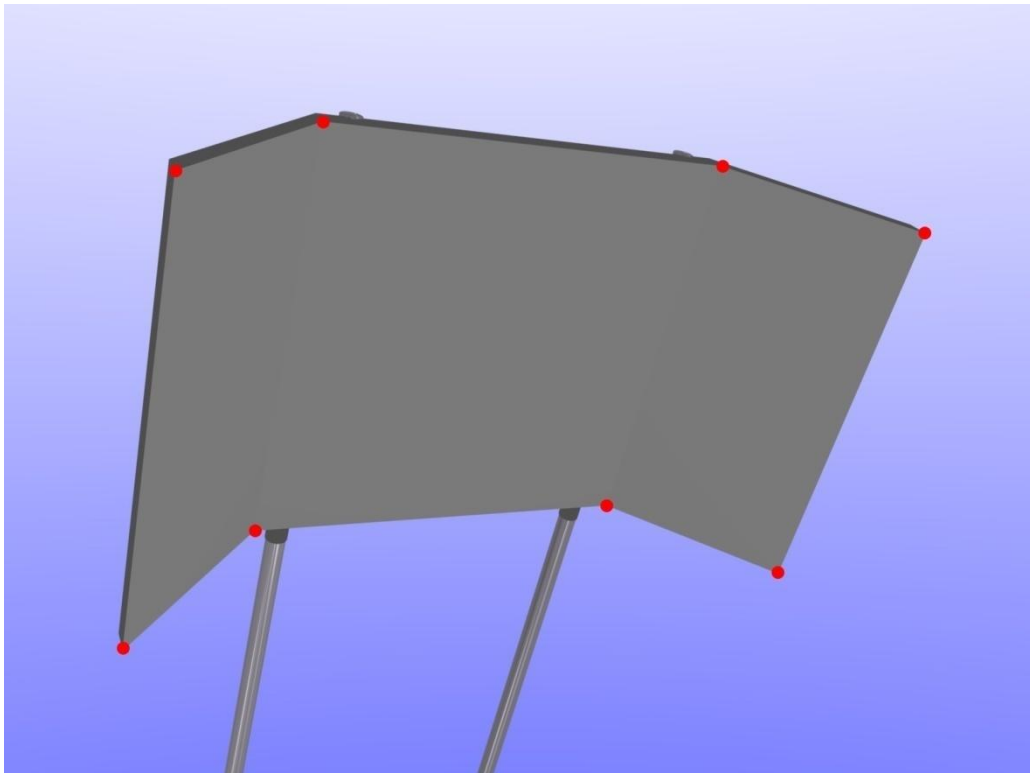

Abb. 4-11 Korrespondierende Randpunkte im untransformierten Bildraum.

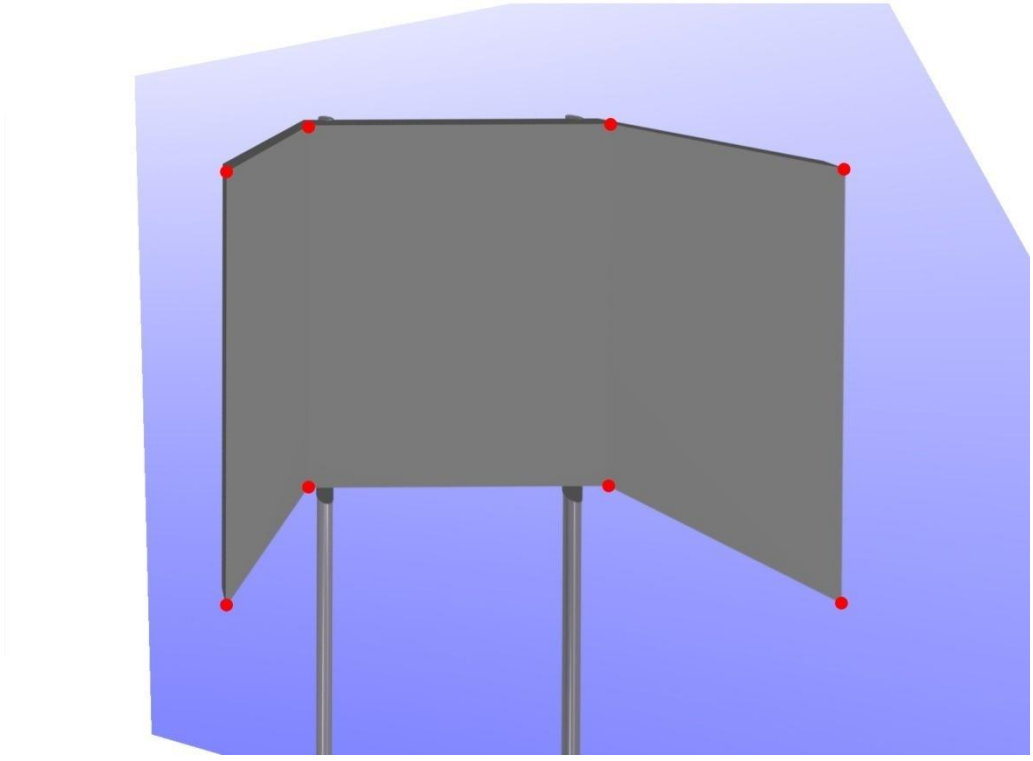

Abb. 4-12 Korrespondierende Randpunkte im transformierten Bildraum.

4.1.3.8 3D-Rekonstruktion

Problembeschreibung: Da sich die Parameter für die Bildkorrektur (uv-Textur-Koordinaten und Blendbilder) aufgrund der unbekannten perspektivischen Verzerrung nicht direkt in der zweidimensionalen Abbildung der Projektionsfläche bestimmen lassen, muss zu diesem Zweck ein 3D-Modell der Projektionsfläche rekonstruiert werden.

Vorbedingungen: Für diesen Schritt des Algorithmus werden die zuvor bestimmten korrespondierenden Randpunkte benötigt. Des Weiteren müssen der Öffnungswinkel der verwendeten Kamera sowie die Breite der aufgenommenen Fotos bekannt sein. Die Projektionsfläche muss außerdem die in der Kapiteleinleitung erwähnten Randbedingungen erfüllen.

Kurzbeschreibung: Zuerst wird das Foto der korrespondierenden Randpunkte in den 3D-Raum transformiert und eine virtuelle Kamera anhand der bekannten Bildbreite und des Öffnungswinkels der Kamera vor diesem platziert. Ausgehend von den korrespondierenden Randpunkten werden Strahlen zum Kamerafluchtpunkt gebildet. Die Eckpunkte der virtuellen Projektionsfläche liegen auf diesen Strahlen. Da es dafür unendlich viele ungültige Lösungen gibt, werden die zuvor erwähnten Randbedingungen der Projektionsfläche zur Bestimmung einer gültigen Lösung herangezogen. Um eine gültige Lösung zu finden, werden ein Initialisierungsschritt und ein Rekonstruktionsschritt durchgeführt. Beim Initialisierungsschritt handelt es sich um ein Optimierungsproblem, bei dem drei Stützvektoren (linker Rand, rechter Rand, Paar mit dem größten z-Abstand) gesucht werden. Diese Vektoren verbinden jeweils zwei korrespondierenden Strahle, sind parallel zueinander, weisen dieselbe Länge auf und stehen senkrecht auf der durch ihre Startpunkte aufgespannten Ebene. Erfüllen diese drei Vektoren sämtliche Randbedingungen, werden die Vektoren der restlichen korrespondierenden Randpunkte im Rekonstruktionsschritt bestimmt. Da bereits drei Stützvektoren gefunden wurden, ist die Platzierung der restlichen Vektoren trivial. Anschließend wird aus sämtlichen Vektoren ein Drahtgittermodell erzeugt, das der Projektionsfläche entspricht.

4.1.3.9 Schnittpunktbestimmung der Kalibrierbilder

Problembeschreibung: Um die Zielbereiche für den uv-Texture-Look-up zu bestimmen, müssen die Schnittpunkte der Kalibrierstreifen im 3D-Modell der Projektionsfläche bestimmt werden. Um die Projektionsfläche vollständig ausnutzen zu können, müssen wiederum Schnittpunkte im Randbereich bzw. außerhalb der Projektionsfläche extrapoliert werden.

Vorbedingungen: Voraussetzung für diesen Schritt des Algorithmus ist die erfolgreiche Filterung der Kalibrierstreifen, die Bestimmung der Parameter für die ad-hoc Linsenentzerrung sowie die Rekonstruktion des 3D-Modells der Projektionsfläche.

Kurzbeschreibung: Die Schnittpunktbestimmung der Kalibrierstreifen ist bei diesem Verfahren ein zweistufiger Prozess. Im ersten Schritt werden die Schnittpunkte im Bildraum analog zu dem im Kapitel 4.1.2.8 beschriebenen Verfahren bestimmt. Anschließend erfolgt wiederum die Extrapolation fehlender Randpunkte. Aufgrund der unbekannten 3D-Form der Projektionsfläche handelt es sich diesmal um eine nicht-lineare Extrapolation. Im zweiten Schritt werden die gefundenen 2D-Schnittpunkte in das 3D-Modell projiziert. Dazu werden Strahlen von den Schnittpunkten in der zweidimensionalen Abbildung (im 3D-Raum) zum Kamerafluchtpunkt gebildet. Die Strahlen schneiden dabei das 3D-Modell. Somit liegen auch die benötigten Schnittpunkte im 3D-Modell der Projektionsfläche vor und können für den abschließenden Schritt des Algorithmus genutzt werden.

4.1.3.10 Parameter für die Bildkorrektur

Problembeschreibung: Ähnlich dem zweiten vorgestellten Verfahren entspricht auch hier der physikalische Rand der Projektionsfläche der größtmöglichen Projektionsfläche, in welche die Bildinhalte eingepasst werden sollen. Hierbei ist zu beachten, dass es sich um eine dreidimensional verformte Projektionsfläche handelt, für die wiederum Warping- und Blending-Parameter bestimmt werden sollen.

Bei diesem Verfahren können die uv-Parameter nicht direkt im Kamerabild (Verfahren 1) und auch nicht mit Hilfe einer Homographie-Transformation (Verfahren 2) bestimmt werden, da zum einen eine unbekannte perspektivische Verzerrung vorliegen kann und andererseits die Projektionsfläche dreidimensional verformt ist.

Vorbedingungen: Für die Bestimmung der Blendbilder und der uv-Koordinaten werden das zuvor rekonstruierte 3D-Modell der Projektionsfläche und die Schnittpunkte der Kalibrierstreifen in diesem 3D-Modell benötigt.

Kurzbeschreibung: Das rekonstruierte 3D-Modell besteht aus n Segmenten. Für jedes dieser Segmente ist die Breite bekannt. Die Summe über alle Segmente ergibt die Gesamtbreite des „abgerollten“ 3D-Modells[95]. Die Höhe ist aufgrund der Randbedingungen für alle Segmente konstant.

Für jeden Schnittpunkt ist bekannt, in welchem Segment sich dieser befindet. Somit lässt sich auch der „abgerollte“ Abstand zum linken Rand und zum unteren Rand bestimmen. Diese Abstände werden durch Gesamtbreite bzw. Höhe dividiert und ergeben die uv-Koordinate des aktuell betrachteten Schnittpunktes[96].

[95] Das „Abrollen“ entspricht einem uv-Unwrapping.

[96] Dabei entspricht die linke untere Ecke des Modells der uv-Koordinate 0, 0 und die rechte obere Ecke des Modell der uv-Koordinate 1, 1.

Nach der Berechnung der uv-Koordinaten werden die Blendbilder analog dem in Kapitel 4.1.1.7 bzw. 7.1.5 beschriebenen Verfahren bestimmt.

Anschließend können die Bildkorrektur-Parameter in Echtzeit zur Erzeugung einer kalibrierten Mehrkanalprojektion eingesetzt werden.

4.1.4 Klassifizierung – Verknüpfung der drei Verfahren

Bisher wurden drei Algorithmen vorgestellt, die für verschiedene Anwendungsfälle konzipiert wurden. Die einfachste Variante zur Wahl des geeigneten Algorithmus kann manuell durch den Nutzer erfolgen. Erfüllt die Projektionsfläche die Bedingungen eines der drei vorgestellten Verfahren, so lässt sich der zu verwendende Algorithmus allerdings auch automatisch bestimmen. Im folgenden Kapitel wird auf diese Möglichkeit näher eingegangen. Die Klassifizierung erfolgt dabei anhand der Unterscheidungsmerkmale der Projektionen der einzelnen Verfahren (siehe Abb. 4-13).

Wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen dem ersten vorgestellten und den beiden anderen Verfahren ist, dass die Projektion bei den beiden Letzteren über die Projektionsfläche hinaus strahlt. Somit weist die Projektion bei den Verfahren 2 und 3 eine erkennbare Diskontinuität zwischen Vorder- und Hintergrund auf. Diese Diskontinuität kann beispielsweise durch eine vom Hintergrund geometrisch getrennte Projektionsfläche oder einen farbigen Rand erzeugt werden. Eine rechnergestützte Erkennung eines solchen Bruches kann über die Kalibrierstreifen sowie das Weißbild erfolgen.

Wie bereits erwähnt, kann mit Hilfe des Weißbildes eine ROI bestimmt werden (siehe Kapitel 4.1.2.6). Alle Bildinformationen außerhalb dieser ROI werden verworfen. Liegt die Projektion vollständig innerhalb der Projektionsfläche, ist das Weißbild nicht fragmentiert. Die ROI entspricht somit dem von der Kamera sichtbaren projizierten Weißbild. Da die ROI maximale Größe aufweist, sind auch alle Kalibrierstreifen für die Kamera sichtbar. Ist dies der Fall, wird Verfahren 1 verwendet (siehe Kapitel 4.1.1).

Bei einer Projektion die über die Projektionsfläche hinaus geht, ist das für die Kamera sichtbare Weißbild fragmentiert oder zu mindestens kleiner als es ursprünglich projiziert wurde. Ist das Weißbild fragmentiert, wird lediglich der größte Bereich als ROI gewählt. Diese ist also aufgrund der Diskontinuität kleiner als die ursprüngliche Projektion. Somit ist die Anzahl der sichtbaren Kalibrierstreifen innerhalb der ROI geringer als die Anzahl der zuvor projizierten Kalibrierstreifen. In diesem Fall muss entschieden werden, ob Verfahren 2 oder Verfahren 3 angewendet werden soll.

Das wesentliche Unterscheidungsmerkmal zwischen Verfahren 2 und 3 ist die Form der Projektionsfläche. Während beim zweiten vorgestellten Verfahren eine rechteckige, planare Projektionsfläche verwendet wird, ist diese beim dritten Verfahren dreidimensional verformt. Somit unterscheiden sich die von der Kamera aus sichtbaren Ränder. Bei der rechteckigen

Projektionsfläche sind alle Ränder Geraden, bei den im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen dreidimensionalen Projektionsflächen sind lediglich zwei Ränder eine Gerade. Die Unterscheidung zwischen rechteckiger, planarer bzw. dreidimensional verformter Projektionsfläche kann über dieses Merkmal erfolgen.

Dazu wird überprüft, ob die Schnittpunkte der projizierten Kalibrierstreifen mit den vier Rändern jeweils eine Gerade bilden. Da die Schnittpunkte noch nicht korrigiert wurden, muss dieser Test unter Berücksichtigung der Linsenverzerrung der Kamera erfolgen. Eine einfache Möglichkeit diesen Effekt zu berücksichtigen, ist es einen Schwellenwert beim Geradentest zu verwenden. Dieser Schwellenwert muss in Abhängigkeit des verwendeten Kameramodells gewählt werden bzw. mit rechteckigen Projektionsflächen, die aus verschiedenen Perspektiven und Abständen fotografiert wurden, trainiert werden.

Weist die so überprüfte Projektionsfläche eine rechteckige, planare Form auf, wird Verfahren 2 verwendet (siehe Kapitel 4.1.2). Andernfalls kommt Verfahren 3 zum Einsatz (siehe Kapitel 4.1.3).

Um den Nutzerkomfort zu erhöhen, kann mit der hier vorgestellten Klassifizierung automatisch einer der drei vorgestellten Algorithmen gewählt werden. Durch die Notwendigkeit der Projektion des Weißbildes ist dies – falls Verfahren 1 zum Einsatz kommt – allerdings mit geringem Mehraufwand verbunden.

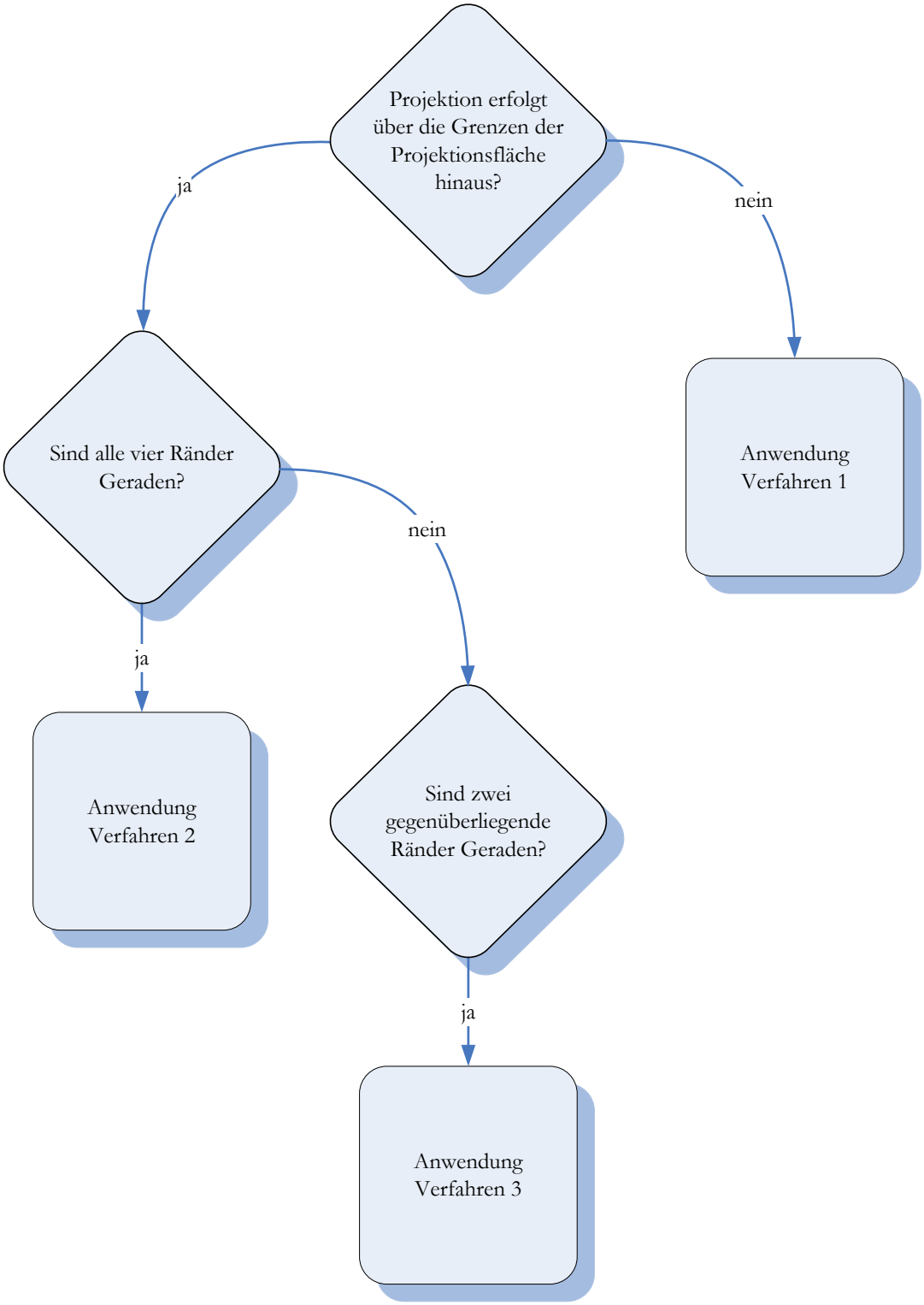

Abb. 4-13 Ablauf der Klassifizierung.

5 Anwendungen

Für die vorgestellten Verfahren gibt es eine Vielzahl von Anwendungen. Im folgenden Abschnitt werden bereits realisierte und einige potenzielle Anwendungsfälle näher betrachtet.

Unabhängig vom verwendeten Verfahren lassen sich folgende typische Anwendungsfälle klassifizieren:

- Mosaicking
    - Auflösungserhöhung
    - Helligkeitserhöhung
- Stacking
    - Helligkeitserhöhung/Redundanz
    - dreidimensionale stereoskopische Projektion
    - Erweiterung des Farbraums
- Vorverarbeitungsschritt.

Mosaicking: Durch die Verwendung mehrerer Projektoren, die überlappend oder aneinanderstoßend ausgerichtet sind, lässt sich die Gesamtauflösung einer Projektion erhöhen. In Abb. 5-1 ist eine unkalibrierte 4-Kanal-Projektion abgebildet und in Abb. 5-2 die kalibrierte Version dieser Installation abgebildet. Neben der Erhöhung der Auflösung lässt sich durch Mosaicking auch die Gesamthelligkeit der Projektion erhöhen. Da die gesamte Projektionsfläche aus mehreren Teilprojektionen zusammengesetzt ist, muss jeder Projektor nur eine kleine Fläche bestrahlen. Je kleiner diese Fläche ist – also je mehr Projektoren eingesetzt werden –, desto heller ist die Projektion.

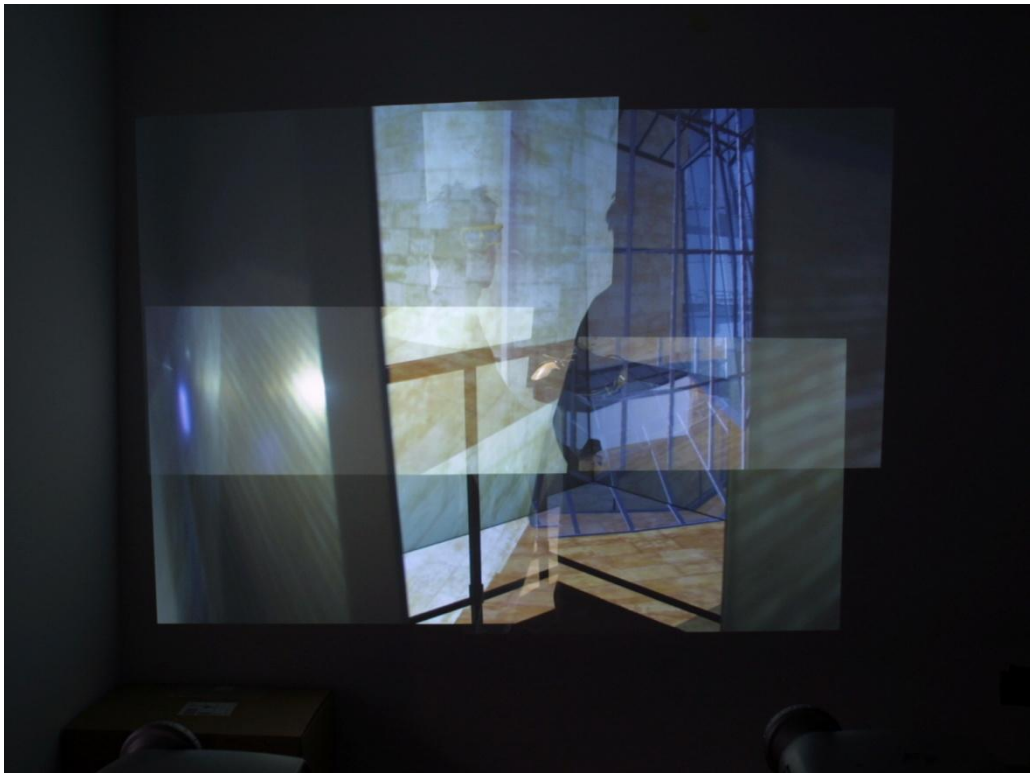

Abb. 5-1 Unkalibrierte 4-Kanal-Projektion.

Abb. 5-2 Kalibrierte 4-Kanal-Projektion.

Stacking: Durch das Übereinanderlegen mehrerer Projektoren ist die erzielte Gesamthelligkeit wesentlich höher als bei einem einzelnen Projektor. Außerdem erhöht sich die Ausfallsicherheit eines Projektionssystems, da sämtliche Projektoren dieselben Bildinhalte projizieren. Derartige Systeme eignen sich daher insbesondere für helle Umgebungen, Konferenzen oder D-Cinema Anwendungen.

Zur Erzeugung einer dreidimensionalen stereoskopischen Projektion wird jeweils ein Bild für das linke und das rechte Auge projiziert. Durch die pixelgenaue Kalibrierung erhöht sich der Komfort des Betrachters, da durch vertikalen Versatz verursachte Kopfschmerzen vermieden werden können (siehe Abb. 5-3).

Ein einzelner Projektor deckt üblicherweise nur einen Teil des sichtbaren Lichtspektrums ab. Um den darstellbaren Farbraum zu vergrößern, kann eine Multispektralprojektion eingesetzt werden. Bei einer derartigen Projektion werden zwei modifizierte LCD-Projektoren verwendet, die wiederum pixelgenau kalibriert werden müssen. Die resultierende Gesamtfarbe wird aus zwei Anteilen zusammengesetzt (Boosmann 2007).

Abb. 5-3 2-Kanal-Projektion zur Erzeugung dreidimensionaler stereoskopischer Bilder.

Vorverarbeitungsschritt: Nach einer erfolgreich durchgeführten Kalibrierung kann die Zuordnung zwischen Projektionsflächenraum und Projektionsraum erfolgen, da bekannt ist, an welchen Ort ein Pixel projiziert wird. Auf diese Informationen können weitere Algorithmen aufsetzen (z.B. per-Pixel Farbkalibrierung, Multitouch-Interaktion).

Neben diesen Einsatzgebieten sollen im Folgenden auch einige speziellere Anwendungen, bei denen die vorgestellten Algorithmen zum Einsatz kommen können, beispielhaft vorgestellt werden.

Kunst und Kultur: Neben den vorgestellten allgemeinen Anwendungsbeispielen lässt sich der erste vorgestellte Algorithmus (AutoCalib – kamerabezogene 2D-Kalibrierung) insbesondere im Rahmen von Kunstinstallationen einsetzen, die interessante Ansichten von Bildern ermöglichen. So kann sich beispielsweise ein kalibriertes Gesamtbild über mehrere Monitore erstrecken, die zueinander dreidimensional verdreht und transliert sind. Aus unterschiedlichen Perspektiven ergeben sich somit auch verschiedene Ansichten. Nähert sich der Betrachter einer bestimmten Position (idealerweise der ursprünglichen Kameraposition) wird das zusammengesetzte Bild immer besser erkennbar (siehe Abb. 5-4 und Abb. 5-5).

Abb. 5-4 Monitorinstallation aus einer Perspektive ungleich der Kameraposition(Foto © Sandra Unger).

Abb. 5-5 Monitorinstallation aus Sicht der Kamera (Foto © Sandra Unger).

Eine Erweiterung dieser Installation um bewegte Monitorsegmente ist auch möglich. Die Kalibrierung erfolgt bei einer derartigen Installation einmalig für bestimmte Keyframes (z.B. Start- und Endposition). Die Zwischenwerte für die Bildentzerrung können dann in Abhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit der einzelnen Segmente interpoliert werden.

Der zweite vorgestellte Algorithmus (AutoCalib2D – projektionsflächenbezogene 2D-Kalibrierung) lässt sich zur Erzeugung virtueller Gemälde in Museen einsetzen. Als Referenz für die Kalibrierung dienen ein oder mehrere reale Bilderrahmen. Die virtuellen Gemälde werden pixelgenau in ihre Rahmen eingepasst (siehe Abb. 5-6 und Abb. 5-7). Eine derartige Installation ermöglicht eine Nutzerinteraktion. So kann beispielsweise der Entstehungsprozess eines Gemäldes nachvollzogen oder versteckte Schichten, die durch Röntgenanalyse entdeckt wurden, dargestellt werden.

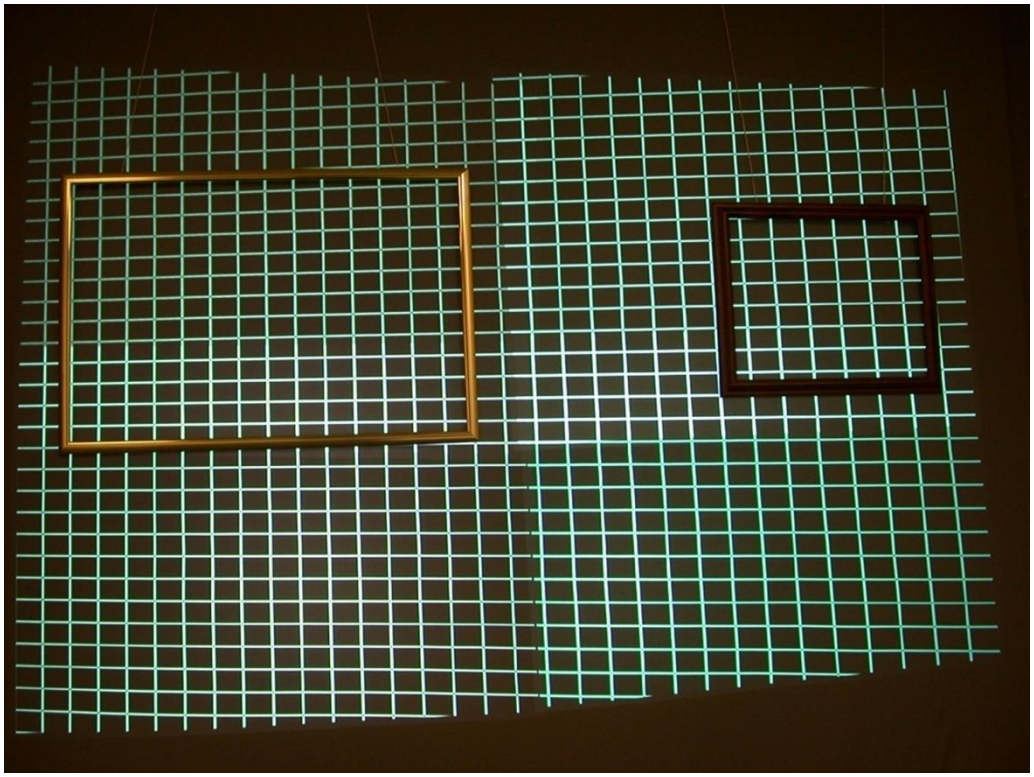

Abb. 5-6 Reale Bilderrahmen für virtuelle Gemälde aus Seales (2005).

Abb. 5-7 Virtuelle Gemälde aus Seales (2005).

Die vorgestellten Algorithmen lassen sich im Theater, bei Musicals oder für Konzerte und Liveshows einsetzen. Bewegliche oder starre Projektionsflächen können mit Inhalten bespielt werden, die an die Form der Projektionsfläche angepasst werden. Zudem besteht die Möglichkeit, bestimmte Kulissen bzw. Bereiche von der Projektion auszuschließen (siehe Abb. 5-8 bis Abb. 5-10) bzw. nur auf diese zu projizieren. Somit können reale mit virtuellen Kulissen kombiniert werden bzw. Schauspieler mit virtuellen Szenen interagieren (Kücholl 2004).

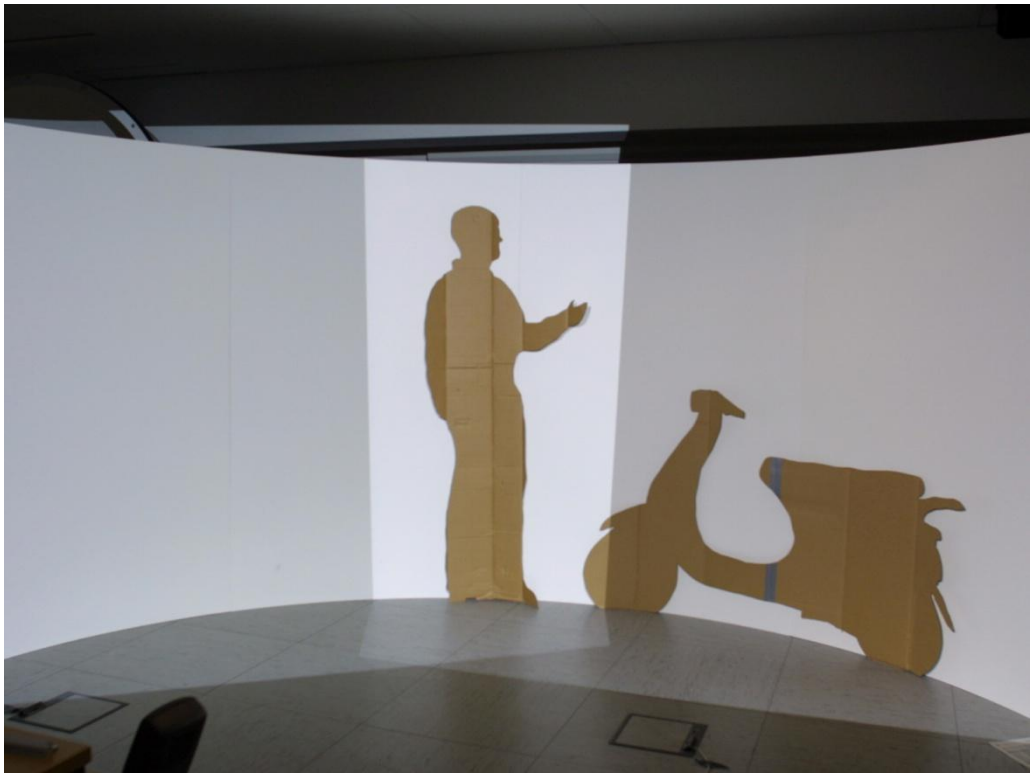

Abb. 5-8 Unkalibrierte Zylinder- und Kulissenprojektion. Die Projektion erfolgt sowohl auf die Kulisse als auch auf die Projektionsfläche.

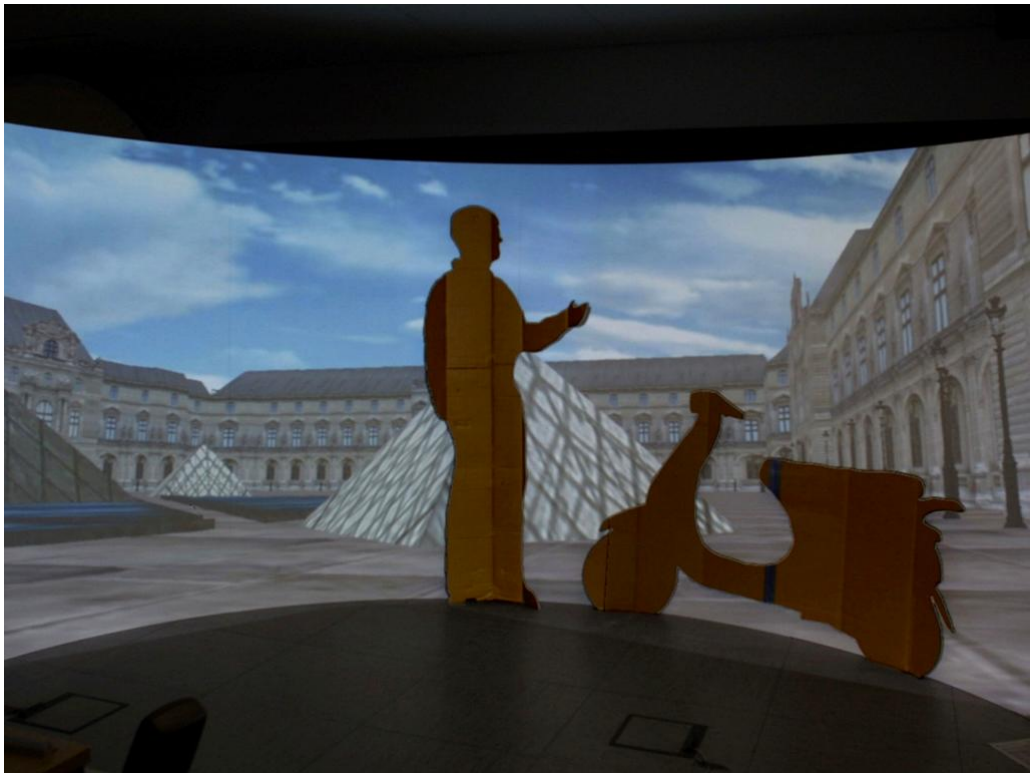

Abb. 5-9 Mit Hilfe der automatischen Kalibrierung, werden die Kulissen von der Projektion ausgeschlossen (3D-Szene © 2nd World, Canal+ Numedia).

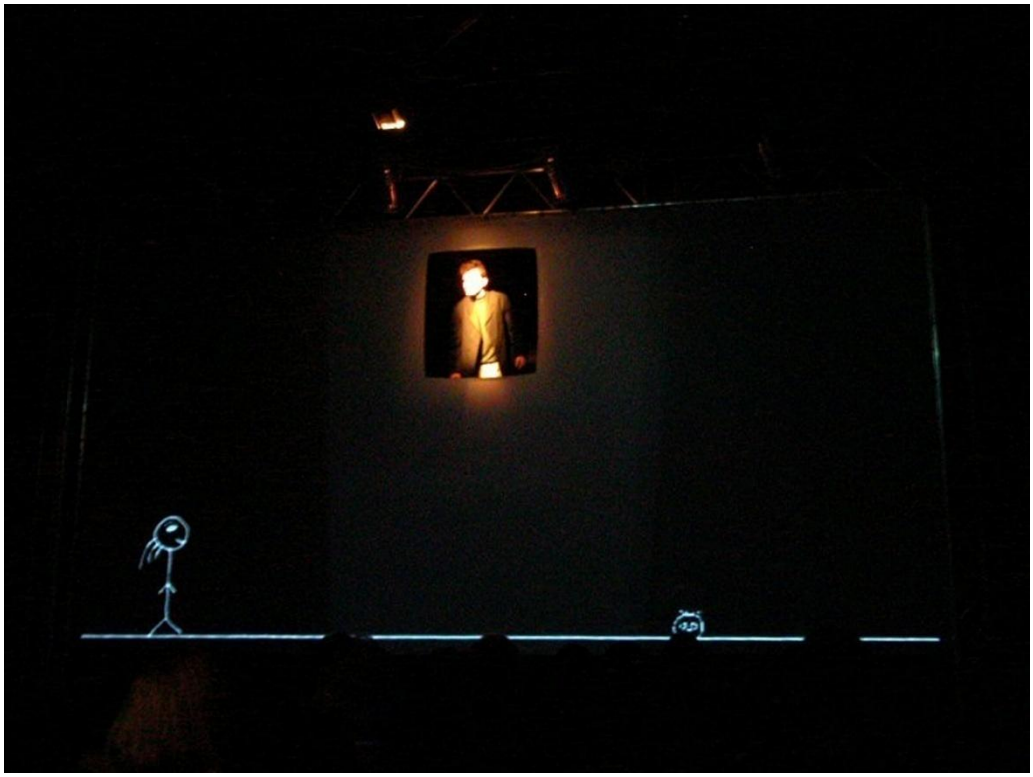

Abb. 5-10 Einsatz der automatischen Kalibrierung beim Theaterstück ProjektX: Kombination einer gestackten 4-Kanal-Projektion mit echtem Schauspieler.

CAVEs: Eine CAVE ist aus rechteckigen Projektionsflächen zusammengesetzt. In den meisten Fällen werden die Bilder auf die Seiten eines speziell ausgerüsteten Raumes projiziert. Eine CAVE kann aber auch für den Wohnbereich adaptiert werden (siehe Abb. 5-11) oder aus LCD-Panels bestehen (Fox 2009).

Die Kalibrierung eines solchen Systems kann mit einer Divide-and-Conquer-Strategie[97] erfolgen. Dabei werden die einzelnen Wände unabhängig voneinander mit Hilfe des zweiten bzw. dritten vorgestellten Verfahrens kalibriert (AutoCalib2D und AutoCalib3D). Das zusammengesetzte Ergebnis ergibt eine über alle Teilflächen kalibrierte Gesamtansicht.

Head-up Displays: In Autos oder Flugzeugen werden Head-up Displays zur Einspielung von Informationen genutzt. Im Gegensatz zu klassischen Visualisierungselementen, wie beispielsweise Tachometern, lassen sich derartige projektionsbasierte Displays frei platzieren. Mit Hilfe der Kalibrierung kann eine automatische Anpassung für verschiedene Nutzer erfolgen, wodurch eine bessere Sicht auf die dargestellten Elemente ermöglicht wird. Die Kalibrierung kann bezüglich eines virtuellen Rahmens oder in Abhängigkeit der Kopfposition des Betrachters erfolgen.

Abb. 5-11 Beispiel für eine CAVE Installation im Wohnbereich (© Fraunhofer FIRST).

[97] Ein komplexes Problem wird durch die Aufteilung in weniger komplexe Teilprobleme wesentlich leichter lösbar.

Werbung und Eyecatcher: Alle drei vorgestellten Algorithmen bieten vielfältige Möglichkeiten im Bereich der Werbung. Eine Projektion kann beispielsweise auf ausgestanzte Firmenlogos oder Projektionsflächen in Messehostessen-Form (Uber 2009) erfolgen. Die Projektion wird wiederum an die Form der physikalischen Projektionsfläche angepasst.

Die Projektion von Informationen oder Werbung kann in Wartebereichen auf Laufbänder bzw. Koffer erfolgen[98]. Dabei werden die Gepäckstücke bzw. Zwischenräume erkannt. Dies kann beispielsweise per Drucksensorik bzw. über eine 3D-Tiefenerkennung[99] erfolgen. Änderungen können somit leicht erkannt werden, so dass die Projektion angepasst werden kann. Aus Gründen der Sicherheit könnten persönliche Informationen wie zum Beispiel: „Herr Müller, Ihr Koffer wurde irrtümlich nach München geflogen.“, kodiert projiziert werden. Diese kodierte Projektion kann wiederum mit der Kamera eines Smartphones erfasst und mit dem persönlichen Schlüssel dekodiert werden.

Projektionen können auch als Ersatz für Straßenlaternen eingesetzt werden. Das klassische Straßenlaternen-Paradigma kann mit Hilfe von Projektionstechnologie erweitert werden. Wird ein Projektor als Lampe benutzt, kann er nicht nur den Weg (verschiedenfarbig) beleuchten sondern auch zusätzliche Informationen einblenden (Werbung, Navigationsinformationen). Die Projektion wird dabei in Bezug auf die Grenzen der Straße bzw. des Bürgersteigs ausgerichtet. Nutzerspezifische Informationen können beispielsweise per Bluetooth abgerufen werden.

Augmented Reality[100]: Durch den Einsatz von Multiprojektorsystemen wird das Wohnzimmer zur immersiven Umgebung. Mit Hilfe der vorgestellten Verfahren werden virtuelle Gemälde in echte Rahmen eingepasst (siehe auch den Punkt „Museen“), das TV-Bild lässt sich beliebig auf den Wänden verschieben, und stimmungsvolles, animiertes Licht umwabert ausgewählte Möbelstücke.

Immersive Umgebungen eignen sich auch hervorragend für Schulungszwecke, da sie – kombiniert mit echten Gegenständen – beispielsweise das kontrollierte Üben in gefährlichen Situationen ermöglichen (siehe Abb. 5-12). Eine weitere Anwendung der erweiterten Realität ist der Supermarkt von morgen. Dort können beispielsweise produktbezogene Zusatzinformationen auf Einkaufsregale projiziert werden (Zurawski 2010), wofür wiederum die vorgestellten Kalibrierverfahren genutzt werden können.

[98] Unter Umständen darf die Projektion nicht auf den Privatbesitz Dritter erfolgen.

[99] Beispielsweise mit dem KINECT Sensor.

[100] Augmented Reality = erweiterte Realität. Hier: Reale Objekte werden durch virtuelle Informationen ergänzt.

Abb. 5-12 Einsatz einer immersiven Projektion zu Schulungszwecken (© Medizinische Fakultät der Universität Münster).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Dissertation wurden drei vollautomatische Verfahren zur Kalibrierung von Multiprojektorsystemen entwickelt. Verfahren 1 (AutoCalib) kalibriert Merkanalprojektionen auf beliebig geformten Flächen. Als Referenzsystem dient dabei die für die Kalibrierung verwendete Kamera. Die Verfahren 2 und 3 (AutoCalib2D und AutoCalib3D) lösen die Kalibrieraufgabe für regelmäßig geformte zwei- bzw. dreidimensionale Projektionsflächen, wobei die Gesamtprojektion an der Form der Projektionsfläche ausgerichtet wird. Die bei diesen Verfahren gelösten Aufgaben sind die Geometriekorrektur (Anpassung der Projektoren zueinander und an die Projektionsfläche) sowie der Helligkeitsabgleich in überlappenden Bereichen der Gesamtprojektion.

Trotz der Verwendung von unkalibrierten Komponenten kann bei den entwickelten Verfahren vollständig auf eine aufwändige und fehleranfällige Systemkalibrierung verzichtet werden, bei der die Relation zwischen Projektoren und Kamera gesucht wird. Beim ersten vorgestellten Verfahren erfolgt lediglich einmalig eine effiziente Bestimmung der radialen Verzerrungskomponenten der verwendeten Kamera. Die Verfahren 2 und 3 lösen dieses Problem mit einer ad-hoc-Linsenentzerrung, die die Parameter anhand der Projektionsfläche selbst bestimmt.

Des Weiteren kommen weder idealisierende mathematische oder Drahtgittermodelle noch exakte Ortsangaben, wie z. B. Position und Ausrichtung der Projektoren und der Kamera, zum Einsatz. Damit entfällt die fehleranfällige und zeitraubende Einmessung der verwendeten Komponenten.

Durch den Verzicht auf die Modifizierung der Projektionsfläche mittels Markern wird wiederum der Einrichtungsaufwand minimiert bzw. eine weitere Fehlerquelle eliminiert.

Bei den entwickelten Verfahren wird aufgrund der einstufigen Vorgehensweise im Kameraraum eine pixelgenaue Kalibrierung erreicht; das heißt, die für die Kalibrierung notwendigen Schnittpunkte der Kalibrierstreifen werden im Kamerabildraum betrachtet. Sie unterliegen keinen qualitätsmindernden Transformationen. Selbst bei geringer Bildauflösung wird aufgrund der verwendeten Filteralgorithmen eine ausgezeichnete Qualität der kalibrierten Projektion erreicht. Auf eine Fehlerkorrektur in einem zweiten Kalibrierschritt kann daher verzichtet werden.

Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung der Verfahren war die Berücksichtigung potenzieller praktischer Anwendungsfälle. Aus diesem Grund wurden insbesondere auch wahrnehmungspsychologische Phänomene betrachtet, da diese die Interpretation visueller Reize und die Wechselwirkung zwischen verschiedenen Reizen (z. B. Projektion und Projektionsfläche) im menschlichen Cortex beeinflussen. Durch die Berücksichtigung bestimmter wahrnehmungspsychologischer Regeln war es möglich, betrachterunabhängige Verfahren zu

entwickeln. Das bedeutet, dass die kalibrierten Mehrkanalprojektionen korrekt wirken, egal wo sich der Betrachter im Raum befindet.

Die drei Verfahren wurden patentiert bzw. sind zum Patent eingereicht.

Als Ausblick sollen abschließend noch einzelne Aspekte genannt werden, durch die die vorgestellten Verfahren noch weiter verbessert werden können.

Bei dynamischen Änderungen der Projektionsfläche bzw. bei einer Verschiebung der Projektoren ist eine ad-hoc-Kalibrierung wünschenswert. Echtzeitfähigkeit kann beispielsweise über eingebettete Wasserzeichen, Feature-Erkennung oder modifizierte Projektoren (Kalibrierbild in der Abtastlücke) erreicht werden.

Bei den drei Verfahren wird lediglich eine Kamera für die Kalibrierung verwendet. Bei sehr komplexen und großen Projektionsflächen ist aber eine Kalibrierung mit mehreren Kameras wünschenswert. Vielversprechende Ansätze zur Montage verschiedener Bildansichten, wie beispielsweise Microsoft Photosynth, sind dafür derzeit allerdings noch zu ungenau.

Des Weiteren könnten Projektoren mit integrierter Kamera, Recheneinheit und Funkmodul genutzt werden (sogenannte Embedded Devices bzw. Eingebettete Systeme), um den Einrichtungsaufwand für den Nutzer zu minimieren.

7 Anhang: Algorithmische Details

7.1 AutoCalib – Kamerabezogene 2D-Kalibrierung

7.1.1 Projektion und Aufnahme der Kalibrierbilder

Im ersten Schritt des Algorithmus erfolgt die Projektion und Aufnahme von Kalibrierbildern. Es werden ein Schwarzbild aller Projektoren sowie horizontale und vertikale Streifen für jeden Projektor dargestellt. Die Aufnahme erfolgen nacheinander mit einer Digitalkamera (siehe Kapitel 3.1.1.3), die die gesamte Projektionsfläche erfasst.

Die horizontalen und vertikalen Streifen (siehe Abb. 7-1 bis Abb. 7-4) wurden in dem hier gezeigten Beispiel mit einem konstantem Abstand von 30 Pixeln und einer Dicke von einem Pixel[101] erzeugt und liefern Informationen über die Lage der Projektoren zueinander und bezüglich der Projektionsfläche. Das Schwarzbild (siehe Abb. 7-5) dient im weiteren Verlauf des Algorithmus der groben Hintergrundentfernung.

Die gleichzeitige Projektion aller Streifen hat den Vorteil, dass der Aufnahmevorgang schnell vonstattengeht. Der Abstand zwischen den Streifen sollte in Abhängigkeit von der Beschaffenheit der Projektionsfläche gewählt werden, da andernfalls sichtbare Fehler in der kalibrierten Projektion auftreten können. Weist die Projektionsfläche z. B. viele Unebenheiten auf, sollte ein kleiner Abstand gewählt werden. Bei nahezu perfekten Flächen genügt ein relativ großer Pixelabstand[102]. Ist der Abstand zwischen den Streifen so klein, dass diese bei der Filterung nicht mehr gut voneinander separiert werden können[103], muss die Projektion in mehreren Durchläufen erfolgen[104].

Bei der gleichzeitigen Projektion müssen alle Streifen sichtbar sein und auch von der Kamera aufgenommen werden, weil beim Fehlen von Streifen nicht sicher ist, ob diese am

[101] Eine größere Dicke hat den Vorteil der besseren Erkennbarkeit und ist somit auch einsetzbar.

[102] Bei praktischen Tests hat sich ein Abstand von 20 Pixeln bewährt.

[103] Dieses so genannte Aliasing beruht auf dem Sampling-Theorem von Nyquist und Shannon. Die abtastende Frequenz muss mindestens doppelt so hoch sein wie die höchste in der Aufnahme vorhandene Frequenz (Nyquist 1928; Shannon 1949; Lavry 2004). Je mehr Projektionen von der Kamera erfasst werden und je geringer der Abstand zwischen den Streifen innerhalb der einzelnen Projektionen, desto höher ist die resultierende Frequenz der Kalibrierstreifen im aufzunehmenden Bild. Des Weiteren ist zu beachten, dass die fotografierten Streifen bei der Bildfilterung durch eine morphologische Operation verbreitert werden. Somit könnten zuvor eventuell gerade noch voneinander separierbare Streifen miteinander verbunden werden, wodurch eine Trennung der einzelnen Streifen nicht mehr möglich ist. Da die nachfolgenden Schritte der Kalibrierung auf den Ergebnissen dieser Filterung basieren, ist die kalibrierte Projektion fehlerbehaftet bzw. unbrauchbar.

[104] Beispielsweise in zwei Durchläufen, bei denen jeweils jeder erste bzw. jeder zweite Streifen projiziert wird. Dadurch halbiert sich in diesem Fall die höchste Streifenfrequenz.

linken, rechten, oberen oder unteren oder im Bereich dazwischen fehlen und die kalibrierte Projektion somit Fehler aufweisen wird.

Alternative Verfahren, bei denen nicht alle Streifen sichtbar sein müssen, sind die farbkodierte Lichtschnitttechnik (Klette 1996) oder die Projektion eindeutig identifizierbarer Symbole (Rekimoto 2000).

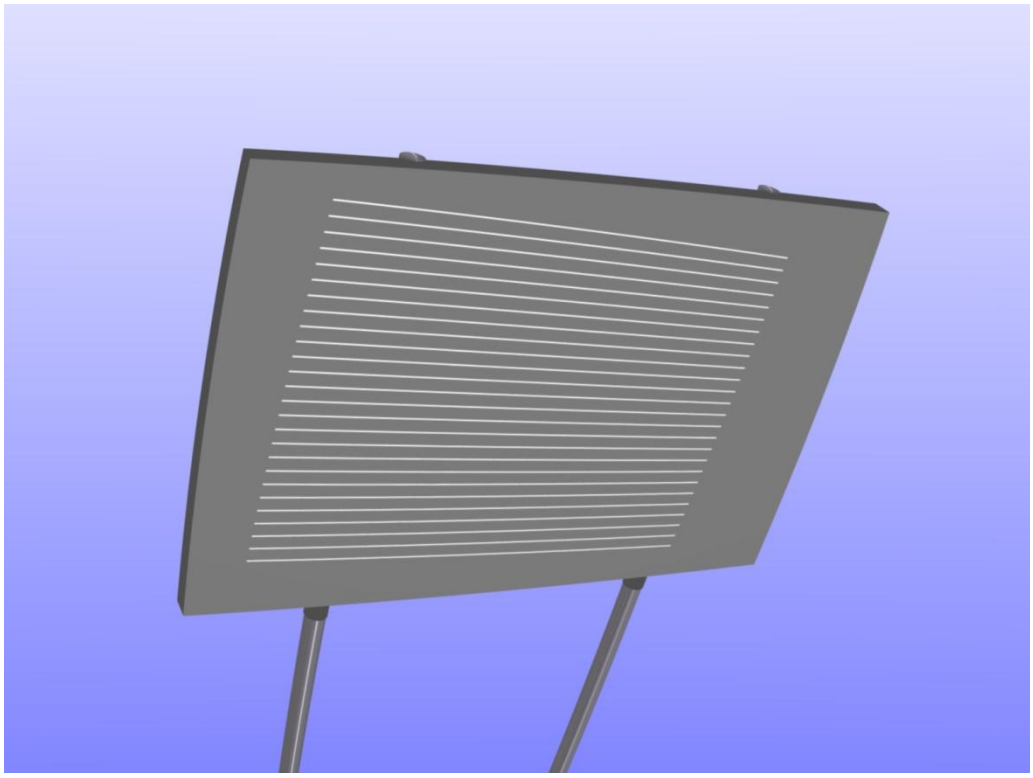

Abb. 7-1 Projektor 1, horizontale Kalibrierstreifen.

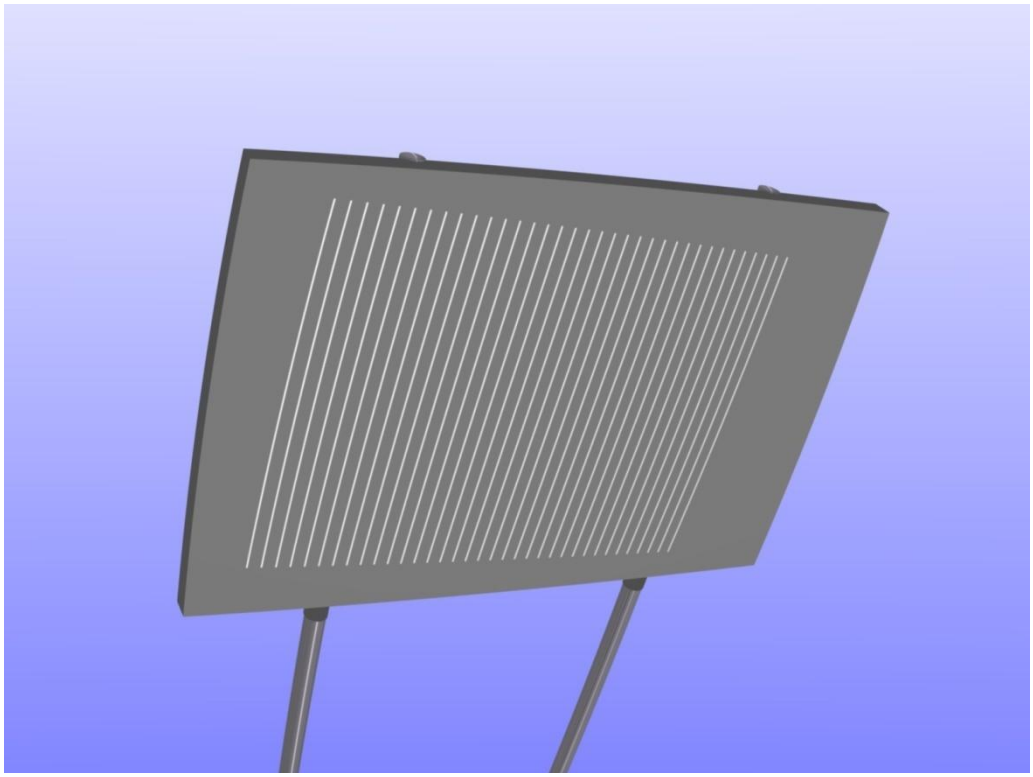

Abb. 7-2 Projektor 1, vertikale Kalibrierstreifen.

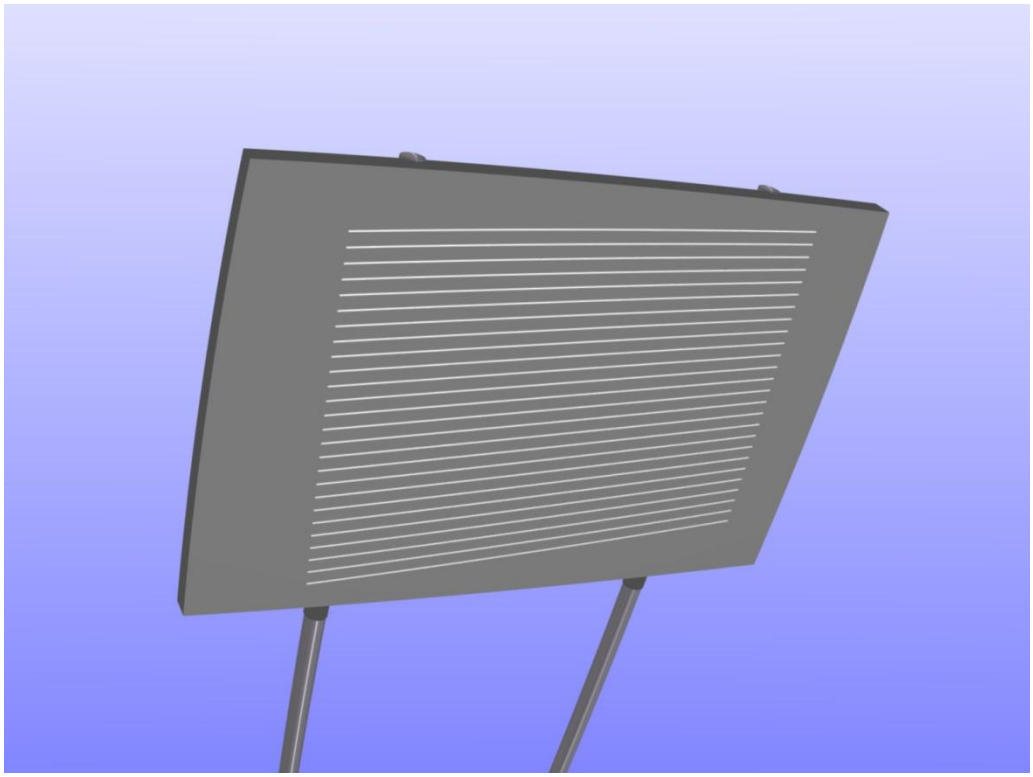

Abb. 7-3 Projektor 2, horizontale Kalibrierstreifen.

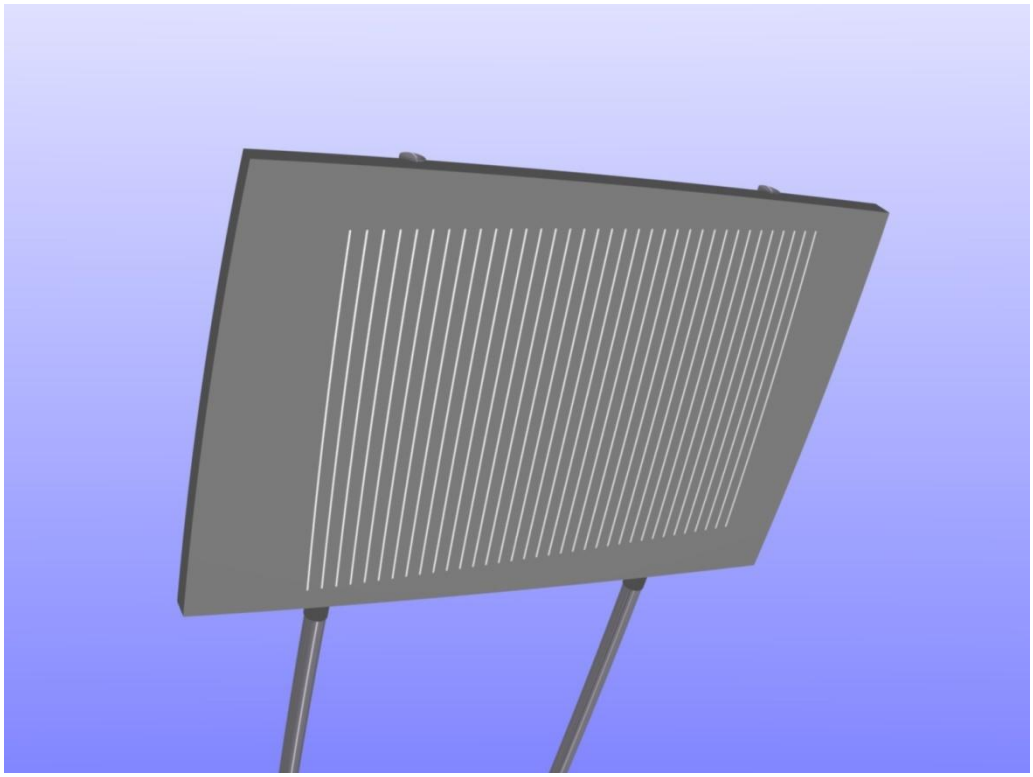

Abb. 7-4 Projektor 2, vertikale Kalibrierstreifen.

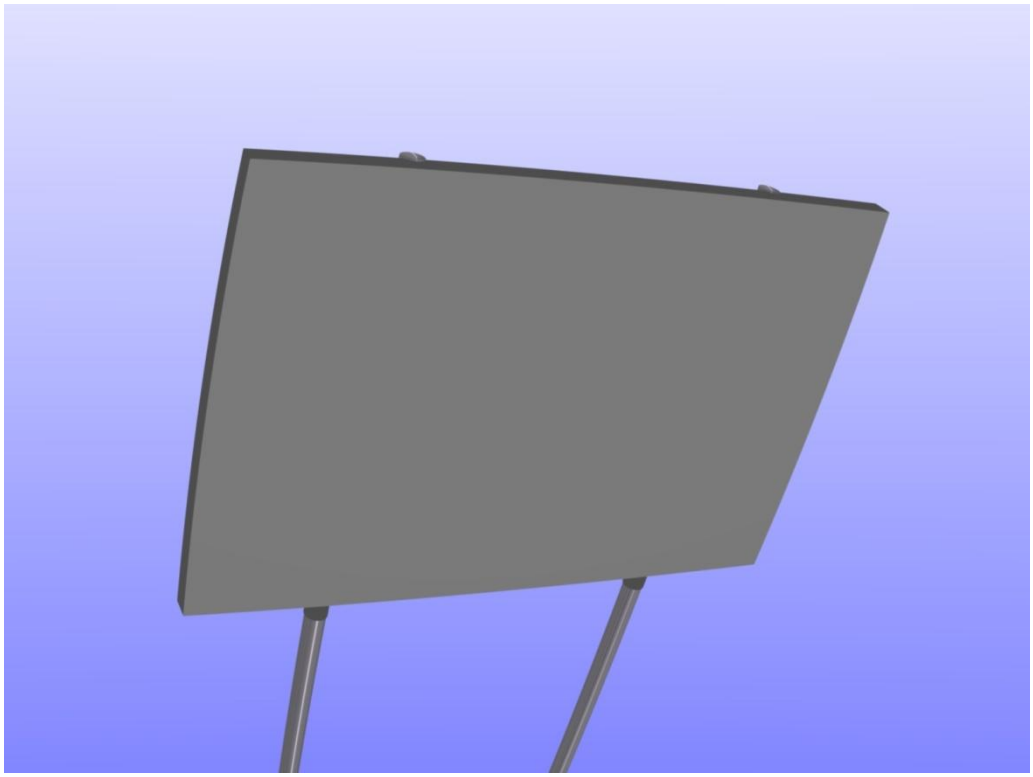

Abb. 7-5 Schwarzbild.

Es sei eine Anzahl von Projektoren mit der Einzelausprägung *projector* sowie deren Bildbreite und -höhe *w(projector)* und *h(projector)*, der Abstand zwischen den Kalibrierstreifen *distance* sowie die Anzahl der Durchläufe *passes* gegeben, so erfolgt die Erzeugung der Kalibrierbilder wie folgt.

In jedem Durchlauf $pass_{current}$ wird zuerst das Kalibrierbild gelöscht und anschließend die Anzahl der vertikalen bzw. horizontalen Kalibrierstreifen $n_{vertical}$ und $n_{horizontal}$ bestimmt (Formel 7-1 und Formel 7-2).

$$n_{vertical} = ceil\left(\frac{w(projector) - pass_{current} \cdot distance}{distance \cdot passes}\right)$$

Formel 7-1 Anzahl vertikaler Kalibrierstreifen im aktuellen Durchlauf.

$$n_{horizontal} = ceil\left(\frac{h(projector) - pass_{current} \cdot distance}{distance \cdot passes}\right)$$

Formel 7-2 Anzahl horizontaler Kalibrierstreifen im aktuellen Durchlauf.

$$ceil(a) = [a] + 1$$

Formel 7-3 Definition der ceil-Operation.

Für jeden Kalibrierstreifen $n_{current}$ wird die jeweilige x- bzw. y-Position im darzustellenden Kalibrierbild berechnet (Formel 7-4 und Formel 7-5).

$$x = \left(n_{vertical_{current}} \cdot passes + pass_{current}\right) \cdot distance$$

Formel 7-4 x-Position des aktuellen Kalibrierstreifens im aktuellen Durchlauf.

$$y = \left(n_{horizontal_{current}} \cdot passes + pass_{current}\right) \cdot distance$$

Formel 7-5 y-Position des aktuellen Kalibrierstreifens im aktuellen Durchlauf.

Ist dieser Wert bestimmt, wird der aktuelle Kalibrierstreifen als eine ein Pixel breite weiße Linie im Kalibrierbild dargestellt. Ein vertikaler Kalibrierstreifen ist durch den Startpunkt (*x, 0*) und den Endpunkt (*x, h(projector)-1*) und ein horizontaler Kalibrierstreifen durch den Startpunkt (*0, y*) und den Endpunkt (*w(projector)-1, y*) definiert.

Sind alle vertikalen bzw. horizontalen Kalibrierstreifen im aktuellen Kalibrierbild gezeichnet, wird das Bild auf dem jeweiligen Projektor ausgegeben und anschließend mit der Kamera aufgenommen.

In Abb. 7-6 wird die Erzeugung von Kalibrierstreifen in drei Durchläufen dargestellt.

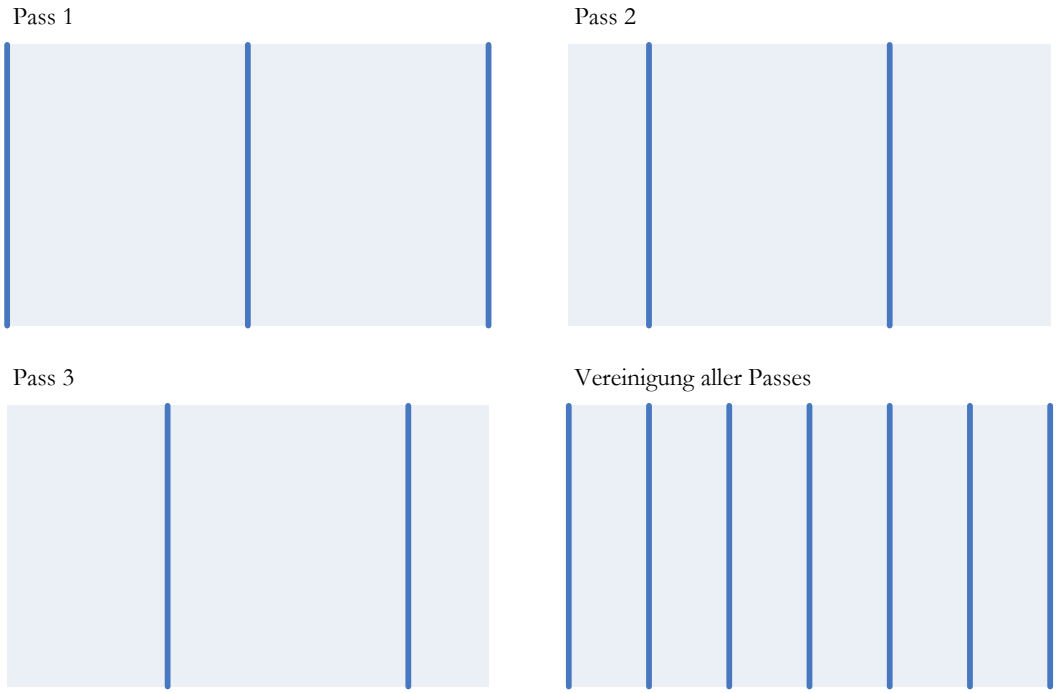

Abb. 7-6 Erzeugung vertikaler Kalibrierstreifen in mehreren Durchläufen (Beispiel).

7.1.2 Filterung der Kalibrierbilder

Im nächsten Schritt erfolgt die Filterung der Kalibrierbilder. Dies soll anhand von Abb. 7-1 beispielhaft für die Filterung einer Aufnahme horizontaler Kalibrierstreifen gezeigt werden[105].

Durch die Aufnahme mit einer (Farb-)Digitalkamera werden die zuvor weißen und einen Pixel breiten Kalibrierstreifen in Form und Farbe durch den Bayer-Sensor und Effekte, wie Linsenverzerrung, Vignetting oder Zoom, verfälscht (siehe Abb. 7-7). Daher müssen diese Effekte bei der Bildfilterung berücksichtigt bzw. korrigiert werden.

Ein Pixel eines CCD[106]-Chips wird üblicherweise[107] aus vier Subpixeln zusammengesetzt. Ein derart zusammengesetzter Pixel wird als Bayer-Sensor bzw. Bayer-Matrix bezeichnet. Da das menschliche Auge empfindlicher auf grün reagiert (CIE 1926), sind dies zwei grüne und jeweils ein blauer und roter Subpixel. Da das Licht, das von Objektkanten ausgeht, unter Umständen nicht alle Subpixel erreicht, kommt es zu Farbverfälschungen an diesen Kanten. Diese sollten kameraseitig bzw. bei der Benutzung korrigiert werden (Furtner 2001; Gunturk 2005)[108].

[105] Die Filterung für die anderen Kalibrierbilder erfolgt analog zu dem hier vorgestellten Verfahren.

[106] Charge Coupled Device. Elektronisches Bauteil zum Transport elektrischer Ladungen.

[107] Alternative Sensortypen, wie z.B. 3-Chip CCDs oder in der Tiefe verteilte farbsensitive Schichten (Foveon) werden in (Sensor 2001; 2002) beschrieben.

[108] Bei den hier vorgestellten Verfahren wird mit JPEGs gearbeitet, deren Farbverfälschungen bereits kameraseitig korrigiert wurden.

Den größten Einfluss auf die Qualität der Kalibrierung hat die Linsenverzerrung. Ihre Korrektur wird ausführlich in Kapitel 4.1.1.5 betrachtet.

Als Vignetting wird der zum Rand hin größer werdende Helligkeitsabfall einer Aufnahme bezeichnet. Der Helligkeitsabfall tritt insbesondere bei kurzen Brennweiten, kleinen Blendenzahlen und schlechter Objektbeleuchtung hervor. Aus diesem Grund sollten die Aufnahmen mit möglichst langen Brennweiten, kleiner Blendenöffnung und vernünftiger Objektbeleuchtung erfolgen (Walree 2009). Eine wesentlich aufwändigere Vignetting-Korrektur von Bildern wird bei Zheng (2006; 2008) beschrieben.

Um die Kalibrierung unabhängig von Kameradistanz, -zoom und -auflösung zu gestalten, muss im weiteren Verlauf des Algorithmus mit dem Zentrum[109] der Kalibrierstreifen gearbeitet werden. Um dieses zu bestimmen, wird bei dem hier beschriebenen Verfahren der linke und rechte bzw. der obere und untere Rand eines Kalibrierstreifens bestimmt. Aus den Rändern wird das Zentrum gemittelt (siehe Abb. 7-8).

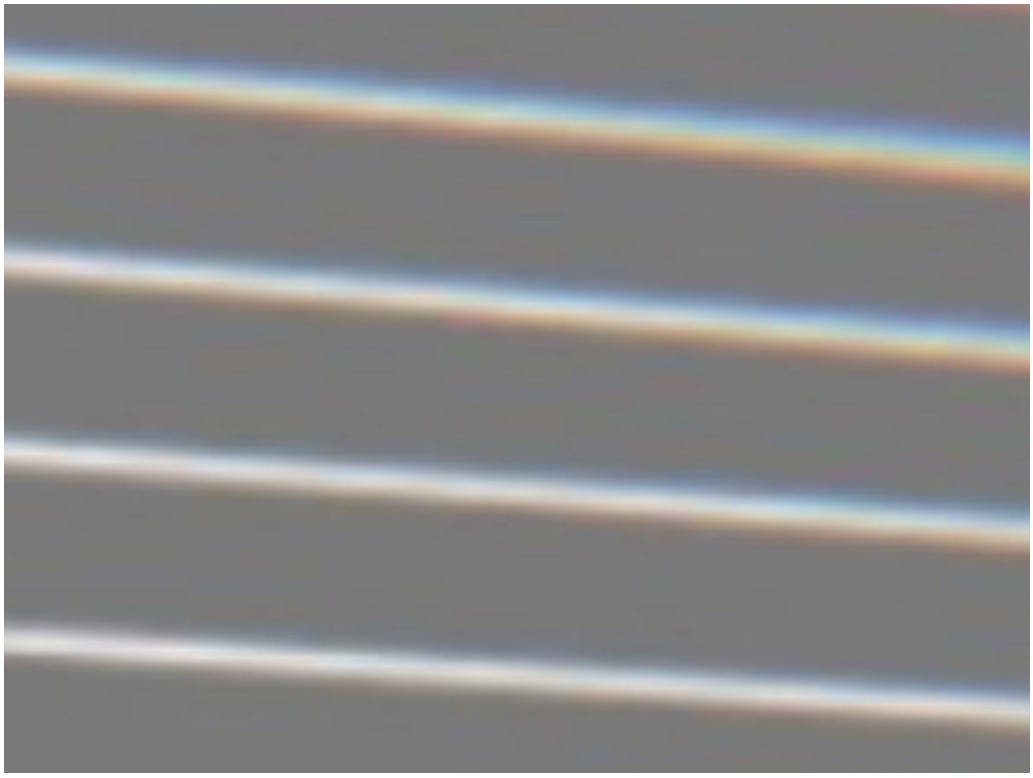

Abb. 7-7 Durch die Kamera verursachte Effekte (vergrößerter Ausschnitt).

[109] Linienzug nach euklidischer Definition (breitenlose Länge), der dem Verlauf des fotografierten Kalibrierstreifens folgt und dabei zum linken und rechten bzw. oberen und unteren Rand des Kalibrierstreifens denselben Abstand aufweist.

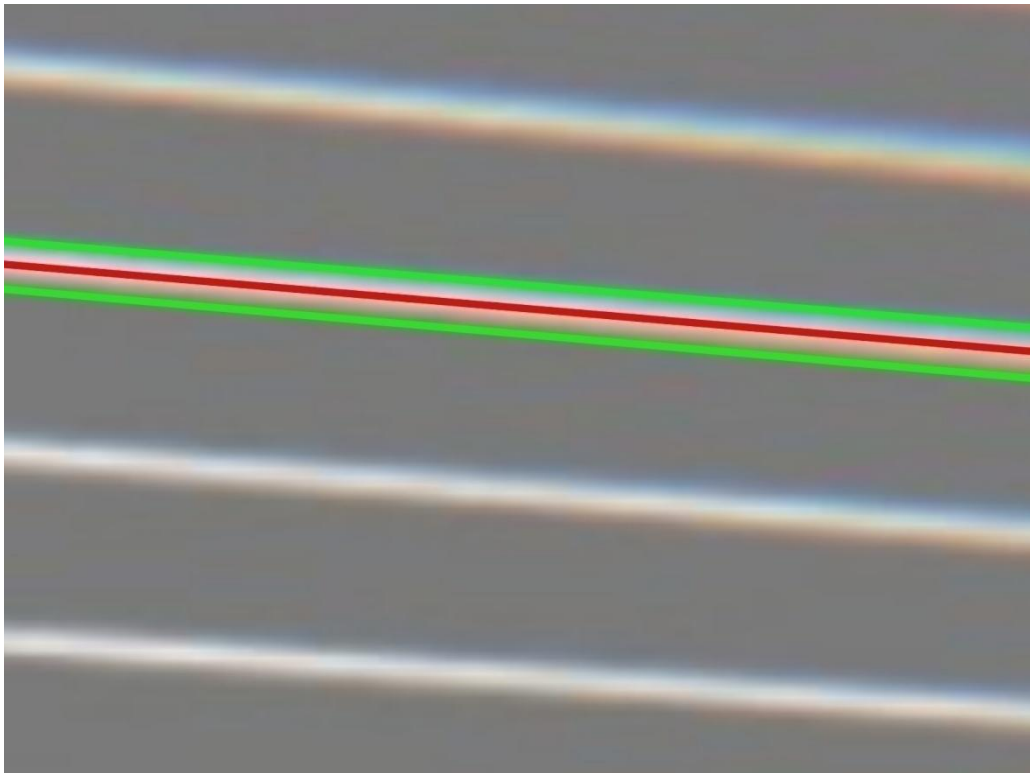

Abb. 7-8 Ränder und Zentrum eines Kalibrierstreifens (vergrößerter Ausschnitt).

Im Rahmen der hier vorgestellten Filterung wird zuerst das Schwarzbild $image_{black}$ von der Aufnahme der Kalibrierstreifen $image_{calib}$ absolut subtrahiert (Formel 7-6, Abb. 7-9 und Abb. 7-10[110]). Dies führt dazu, dass störende statische Hintergrundobjekte aus dem Bild entfernt werden. Somit sind nur noch die für die Kalibrierung interessanten Streifen im Bild $image'_{calib}$ vorhanden.

$$image'_{calib} = |image_{calib} - image_{black}|$$

Formel 7-6 Absolute Subtraktion des Schwarzbildes.

Das subtrahierte Bild wird anschließend für jeden Pixel analog der Formel 7-7 in ein Graustufenbild transformiert. Ein Pixel an der Position *x, y* wird in seine Primärfarbanteile *red(x, y)*, *green(x, y)* und *blue(x, y)* zerlegt. Das Resultat ist der Grauwert *g(x,y)*.

$$g(x,y) = 0.3 \cdot red(x,y) + 0.6 \cdot green(x,y) + 0.1 \cdot blue(x,y)$$

Formel 7-7 Graustufen-Transformation[111].

[110] Der besseren Darstellung wegen wurde das Ergebnis der Subtraktion invertiert.

[111] Die Konstanten können je nach verwendeter Software leicht variieren. Die Bildbearbeitungssoftware GIMP benutzt die Werte 0.3, 0.59, 0.11 (Bunks 2000). Photoshop und Matlab führen die Konvertierung anhand der Rec. 601 luma Koeffizienten 0.299, 0.587, 0.114 durch (Luma; Matlab; Poynton 1999).

Dies geschieht vor allem aus Gründen der Komplexitätsreduktion der nachfolgenden Rechenschritte. Ein Graustufenbild enthält nur ein Drittel der Informationen eines RGB[112]-Bildes und kann somit effizienter prozessiert werden.

Durch die Graustufen-Transformation werden aber auch die durch den Bayer-Sensor bzw. die chromatische Aberration hervorgerufenen farbigen Ränder der Kalibrierstreifen umgewandelt, so dass diese als weniger störend wahrgenommen werden.

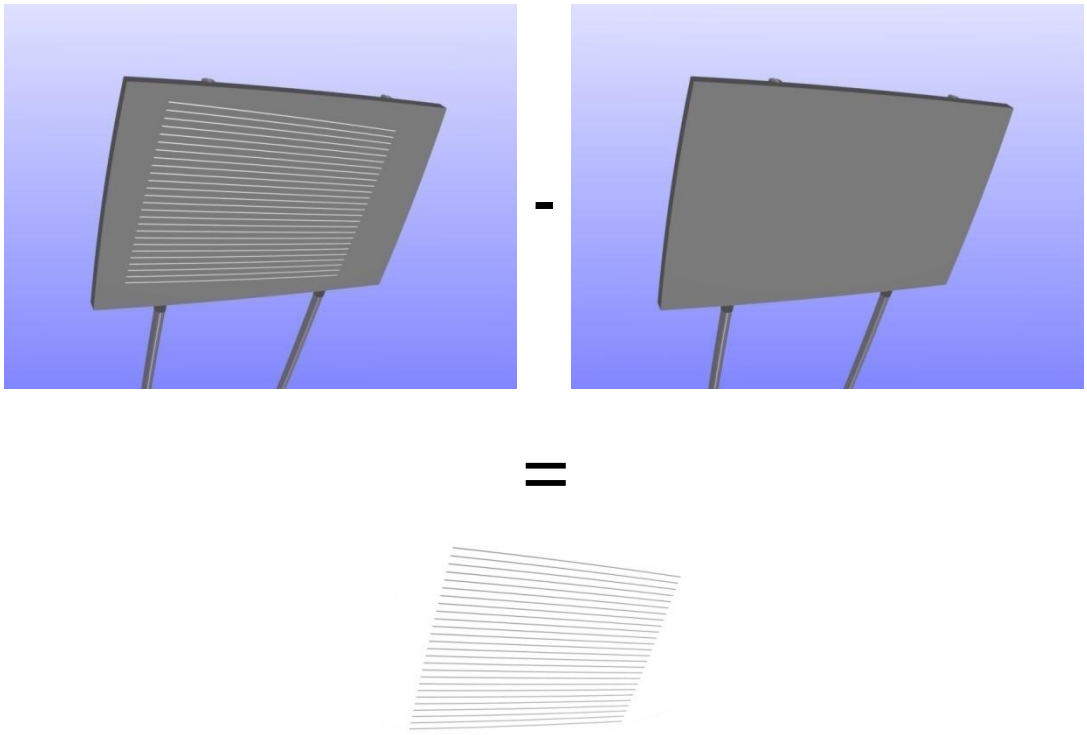

Abb. 7-9 Absolute Subtraktion des Schwarzbildes (invertiert).

[112] RGB: Die drei Farbkanäle Rot, Grün und Blau eines digitalen Bildes.

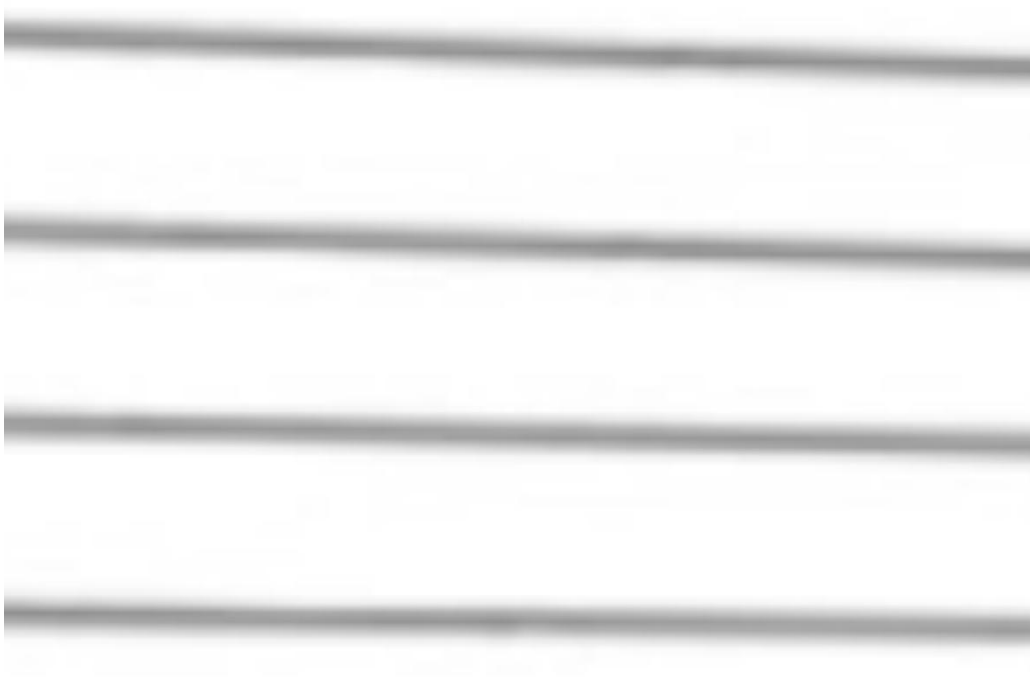

Abb. 7-10 Invertiertes Ergebnis der Subtraktion nach Graustufen-Transformation (vergrößerter Ausschnitt).

Das Ergebnis der Subtraktion wird einer Binärfilterung unterzogen. Der Schwellenwert für diese Filterung kann entweder manuell festgelegt oder automatisch aus einem Histogramm abgelesen werden.

Das hier verwendete Histogramm enthält die absolute Häufigkeit jedes im Bild vorkommenden Grauwertes (Rupprecht 2003). Es kann als eindimensionales Array repräsentiert werden. Für ein 8-bit-Graustufenbild hat dieses Feld 256 Einträge, die initial alle null sind. Zur Bestimmung des Histogramm-Arrays *h* werden alle Grauwerte eines Bildes *g(x,y)* wie folgt betrachtet:

$$\forall\, g(x,y): \quad h[g(x,y)] + +$$

Formel 7-8 Histogramm eines Grauwertbildes.

Aufgrund der zuvor durchgeführten Subtraktion und Invertierung treten im Bild vor allem helle Hintergrund-Pixel und dunkle Kalibrierstreifen-Pixel auf. Dies führt zu zwei stark ausgeprägten Maxima im Histogramm. Zur Klassifizierung der Kalibrierstreifen-Pixel, wird ein Schwellenwert gesetzt. Alle Grauwerte unterhalb dieser Schwelle werden in schwarze Pixel, alle Grauwerte über der Schwelle in weiße Pixel umgewandelt. Die Breite der schwarzweißgefilterten Kalibrierstreifen hängt vom Schwellenwert zwischen den beiden Maxima ab. Befindet sich die Schwelle dichter am hellen Maximum, werden die gefilterten schwarzen Kalibrierstreifen dicker, ist die Schwelle dichter am dunklen Maximum, werden diese Streifen

dünner[113]. Die Schwelle sollte im Tal zwischen beiden Maxima gesetzt werden, um eine gute Separierung zu erreichen. Das Ergebnis einer derartigen Schwarzweißfilterung ist in Abb. 7-11 zu sehen.

Möglicherweise auftretende kleinere Löcher im Schwarzweißbild werden mit morphologischen Operationen (Fisher 2003) korrigiert. Eine derartige Operation wird auf einem Schwarzweißbild *A* anhand eines Structuring Elements[114] *B* durchgeführt. In dieser Arbeit wird die Closing-Operation verwendet. Closing ist eine zusammengesetzte Operation, bei der zuerst eine Dilation[115] $\oplus$, gefolgt von einer Erosion $\ominus$, angewendet wird (siehe Formel 7-9).

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B$$

Formel 7-9 Closing Operation.

Das Zentrum des Structuring Elements wird sowohl bei Dilation als auch bei Erosion über sämtliche Pixel des Bildes geschoben. Dabei erfolgt ein Vergleich der Vordergrundwerte im Structuring Element und der korrespondierenden Pixel im überdeckten Ausschnitt des Bildes. Weist bei der Dilation mindestens eines dieser Paare identische Werte auf, so wird der aktuell betrachtete Pixel als zu setzend markiert[116]. Die Dilation kann auch als Stempel interpretiert werden. An jeder Vordergrund-Pixelposition in *A* wird dieses Bild mit *B* abgestempelt. Somit werden bei der Dilation die Ränder einer Region vergrößert. Formell betrachtet entspricht A_b der Verschiebung von *A* um die in *B* gesetzten Vordergrundpixel. Der Verschiebungsvektor entspricht dabei dem Abstand eines Vordergrundpixels *b* in *B* zum Zentrum von *B*. Diese verschobenen Bilder werden anschließend durch eine ODER-Operation vereint (siehe Formel 7-10).

$$A \oplus B = \bigcup_{b \in B} A_b$$

Formel 7-10 Dilation.

Bei der Erosion wird ein Pixel nur dann als zu setzend markiert, wenn beim Vergleich sämtliche korrespondierenden Paare in ihrer Vordergrundfarbe identisch sind. Es wird also ge-

[113] Der Graustufengradient am Rand der Kalibrierstreifen wird somit entweder als Teil des Streifens bzw. als Teil des Hintergrunds interpretiert.

[114] Auch Structuring Matrix, Strukturmaske oder Kernel genannt. In diesem Fall eine 3×3 Matrix mit dem Ursprung 0,0 im Zentrum der Matrix, die die Details der durchzuführenden Operation beinhaltet. Die Matrix beinhaltet bei Schwarzweißbildern nur die Werte für Vordergrund (aufgrund der Invertierung hier null) bzw. Hintergrundwerte (hier eins).

[115] Wird auch als Dilatation bezeichnet.

[116] Der Pixel darf nicht ins aktuell betrachtete Bild gesetzt werden, da er sonst die aktuelle morphologische Operation beeinflussen würde.

prüft, ob das Structuring Element mit der zu prüfenden Region vollständig identisch ist. Dadurch werden Randbereiche entfernt und die betrachtete Region wieder verkleinert. A_b wird wiederum durch die Verschiebung von *A* um die in *B* gesetzten Vordergrundpixel bestimmt (siehe Dilation). Aus den verschobenen Bildern wird anschließend durch eine UND-Operation die Schnittmenge gebildet (siehe Formel 7-11).

$$A \ominus B = \bigcap_{b \in B} A_b$$

Formel 7-11 Erosion.

Durch das Füllen von Löchern und die anschließende Ausdünnung werden kleinere Artefakte aus dem Bild entfernt (siehe Abb. 7-12).

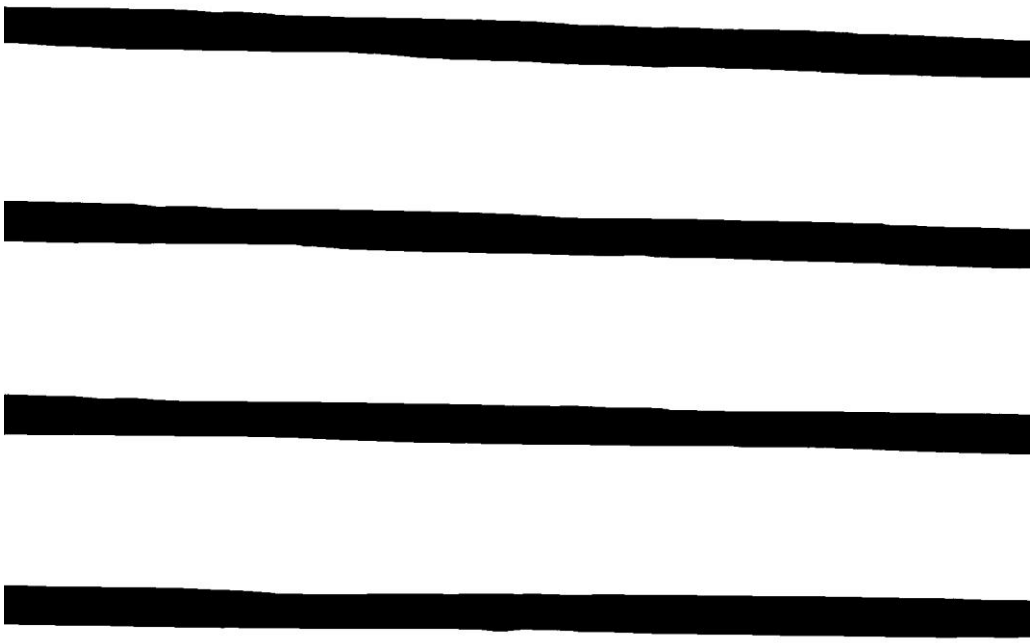

Abb. 7-11 Binarisiertes Streifenbild (vergrößerter Ausschnitt).

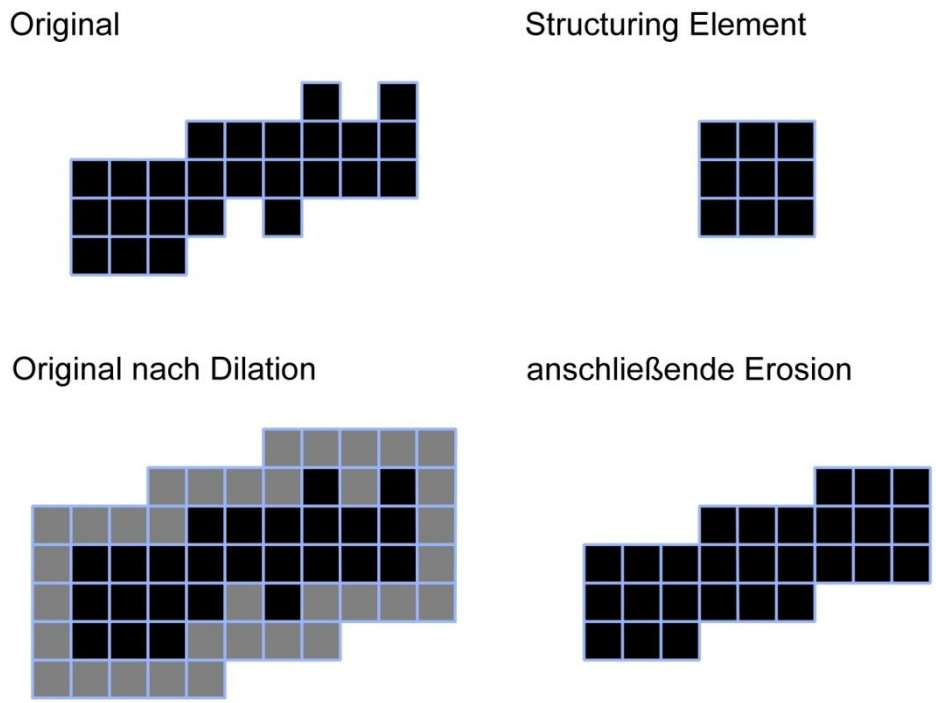

Abb. 7-12 Morphologische Operation Closing.

Die somit geglätteten und binarisierten Kalibrierstreifen sind aber immer noch mehrere Pixel breit. Zur anschließenden effizienteren Speicherung werden die Kalibrierstreifen durch ihren linken und rechten bzw. oberen und unteren Rand repräsentiert. Dazu werden die binarisierten Bilder mehreren diskreten zweidimensionalen Faltungsoperationen unterzogen.

Sei *g(x, y)* ein Grauwert an Position *x, y* eine Bildes der Breite *w* und der Höhe *h* (siehe Formel 7-12) und *M* eine n × n Faltungsmatrix[117] (siehe beispielhaft in Formel 7-15 und Formel 7-16).

$$g(x,y) = \begin{cases} 0 & falls \quad x < 0 \vee x > w-1 \vee y < 0 \vee y > h-1 \\ g(x,y) & sonst \end{cases}$$

Formel 7-12 Grauwert für die Faltungsoperation.

Die Matrix *M* wird bei der Faltungsoperation[118] über jeden Pixel *g(x, y)* geschoben. Das Zentrum der Matrix liegt dabei immer über dem aktuell betrachteten Pixel. Jedes Element der Matrix liegt ebenfalls über einem der benachbarten Pixel. Matrixelement und Pixel bilden somit ein korrespondierendes Paar. Zur Bestimmung des gefalteten neuen Grauwerts *g(x,y)'*, werden sämtliche korrespondierenden Paare miteinander multipliziert und anschließend addiert (siehe Formel 7-14). Die Summationsgrenzen sind von der Anzahl der Zeilen

[117] Wird auch als Filter-Kernel bezeichnet. Die Einträge in dieser Matrix können reelle Zahlen sein.
[118] Wird auch als Convolution bezeichnet.

bzw. Spalten *n* der Matrix *M* abhängig (siehe Formel 7-13).

$$start = -floor\left(\frac{n}{2}\right)$$
$$end = -start$$

Formel 7-13 Wertebereich für die Faltungsoperation.

$$g(x,y)' = \sum_{i=start}^{end} \sum_{j=start}^{end} g(x+i, y+j) \cdot M(i,j)$$

Formel 7-14 Zweidimensionale, diskrete Faltungsoperation.

Zur Bestimmung des linken und rechten bzw. oberen und unteren Randes werden vertikale bzw. horizontale Versatzfilter eingesetzt (siehe Formel 7-15 und Formel 7-16). Je nach Richtung des Versatzfilters wird eine weiße Fläche in eine der vier Richtungen ausgedünnt, so dass lediglich ein Rand mit einer Breite von einem Pixel als Ergebnis der Filterung übrig bleibt[119].

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Formel 7-15 Filter-Kernel für horizontale Versatzfilter.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Formel 7-16 Filter-Kernel für vertikale Versatzfilter.

Mit diesen speziellen Filter-Kerneln kann Formel 7-14 wie folgt vereinfacht werden.

$$g(x,y)' = g(x,y) - g(x,y-1)$$
$$g(x,y)' = g(x,y) - g(x,y+1)$$

Formel 7-17 Vereinfachte horizontale Versatzfilter.

$$g(x,y)' = g(x,y) - g(x-1,y)$$
$$g(x,y)' = g(x,y) - g(x+1,y)$$

Formel 7-18 Vereinfachte vertikale Versatzfilter.

Das Ergebnis einer derartigen Filterung wird in Abb. 7-13 beispielhaft für die Filterung des oberen und unteren Randes der binarisierten Kalibrierstreifen dargestellt. Jeder Kalibrierstreifen ist nun durch seine Ränder als Pixelzug repräsentiert. Diese Ränder werden in zwei Arrays – für horizontale und vertikale Streifen – gespeichert.

[119] Die Orientierung der binarisierten Kalibrierstreifen sollte weniger als 45° von ihrer Idealorientierung abweichen, da andernfalls Löcher im gefilterten Bild auftreten, die anschließend geschlossen werden müssen.

Die hier aufgezeigte globale Lösung[120] für die Filterung der Kalibrierstreifen ist bei relativ gleichmäßiger Ausleuchtung des Kamerabildes gut geeignet. Kann dies durch zu starkes Vignetting der Projektoren oder eine ungeeignete Projektionsfläche nicht gewährleistet werden (siehe Abb. 7-14), muss auf ein lokales Verfahren zurückgegriffen werden. Das kamerabasierte Vignetting kann durch die Subtraktion des Schwarzbildes nahezu entfernt werden. Dies gilt leider nur bedingt für das Vignetting der Projektoren[121]. Wie man im rechten Teilbild von Abb. 7-15 sieht, würde ein globaler Schwellenwert zur Abschneidung wichtiger Informationen führen. Aus diesem Grund sollten bei schlechter Hardware-Ausstattung aufwändigere lokale Verfahren zur gradientenbasierten Konturverfolgung eingesetzt werden (Demant 2002; Bässmann 2004).

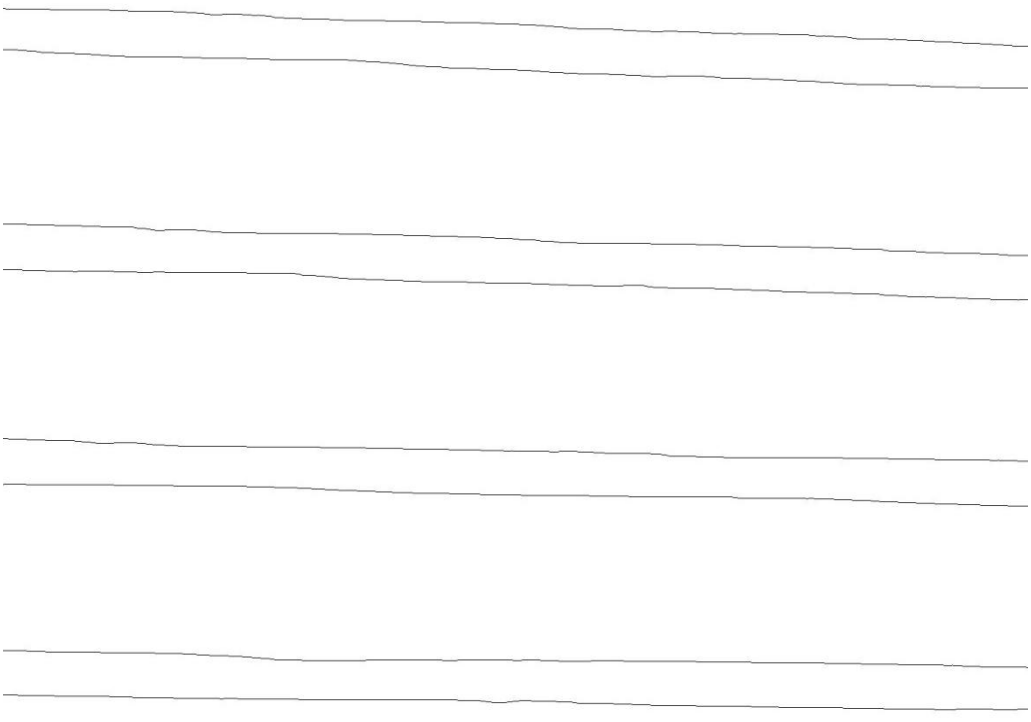

Abb. 7-13 Durch horizontale Versatzfilter erkannte Ränder (vergrößerter Ausschnitt).

[120] Die Filterparameter sind für das gesamte Bild identisch.

[121] Durch die Projektion verschiedener Grauwert-Bilder kann ein helligkeitsabhängiges Vignetting-Modell erzeugt werden. Dies führt aber zu einem wesentlich höheren Aufwand bei der Filterung, da dieser Schritt bei jeder Kalibrierung durchgeführt werden muss (zum Zeitpunkt der Benutzung der Vignetting-Korrektur ist das Mapping vom Projektor zur Projektionsfläche noch nicht bekannt).

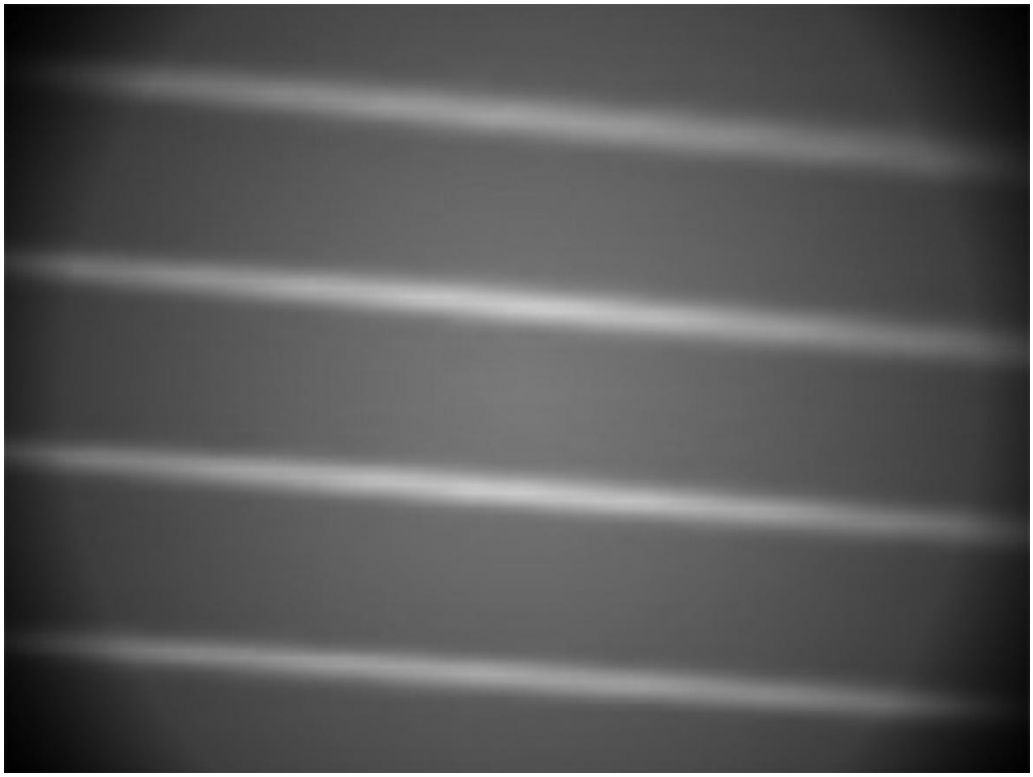

Abb. 7-14 Kalibrierstreifen mit starkem Vignetting (vergrößerter Ausschnitt).

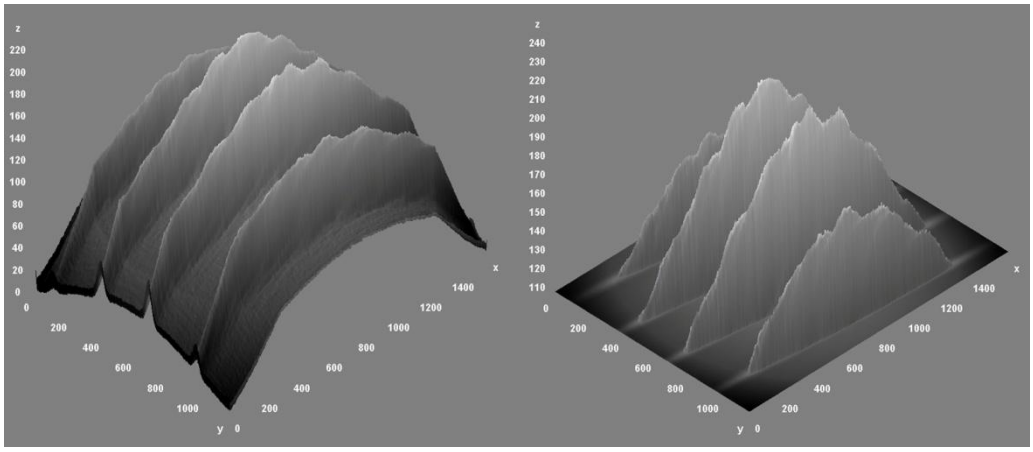

Abb. 7-15 Gradientenverlauf und Schwellenwertfilterung bei starkem Vignetting.

7.1.3 Schnittpunktbestimmung der Kalibrierbilder

Nach Durchführung der hier vorgestellten Filterung der Kalibrierbilder liegen für jeden Kalibrierstreifen der linke und rechte bzw. obere und untere Rand vor. Für einen weiteren Schritt des Algorithmus (siehe 4.1.1.7) werden allerdings die Schnittpunkte der Kalibrierstreifen benötigt. Es sollen daher Möglichkeiten zur Bestimmung dieser Schnittpunkte vorgestellt werden.

Eine einfache Variante ist, die jeweils zusammengehörigen vertikalen Ränder mit den jeweils zusammengehörigen horizontalen Rändern zu schneiden. Sei *i* der Index der vertikalen

Ränder, *j* der Index der horizontalen Ränder und *stripes* das Array der gefilterten Ränder, so werden die vier Schnittpunkte s_1 bis s_4 wie folgt bestimmt:

$$\forall i,j: \quad \begin{cases} s_1 = stripes_{2i} \cap stripes_{2j} \\ s_2 = stripes_{2i+1} \cap stripes_{2j} \\ s_3 = stripes_{2i+1} \cap stripes_{2j+1} \\ s_4 = stripes_{2i} \cap stripes_{2j+1} \end{cases}$$

Formel 7-19 Schnittpunktbestimmung der Ränder.

Es findet eine UND-Operation[122] sämtlicher zusammengehöriger Streifenpaare statt. Ein Schnittpunkt zeichnet sich dadurch aus, dass ein Pixel aus einem vertikalen Streifen und ein Pixel aus einem horizontalen Streifen übereinanderliegen. Da gesetzte Pixel den Wert 1 und ungesetzte Pixel den Wert 0 haben[123], bleiben bei der UND-Operation[124] lediglich die Schnittpunkte übrig (siehe Abb. 7-16).

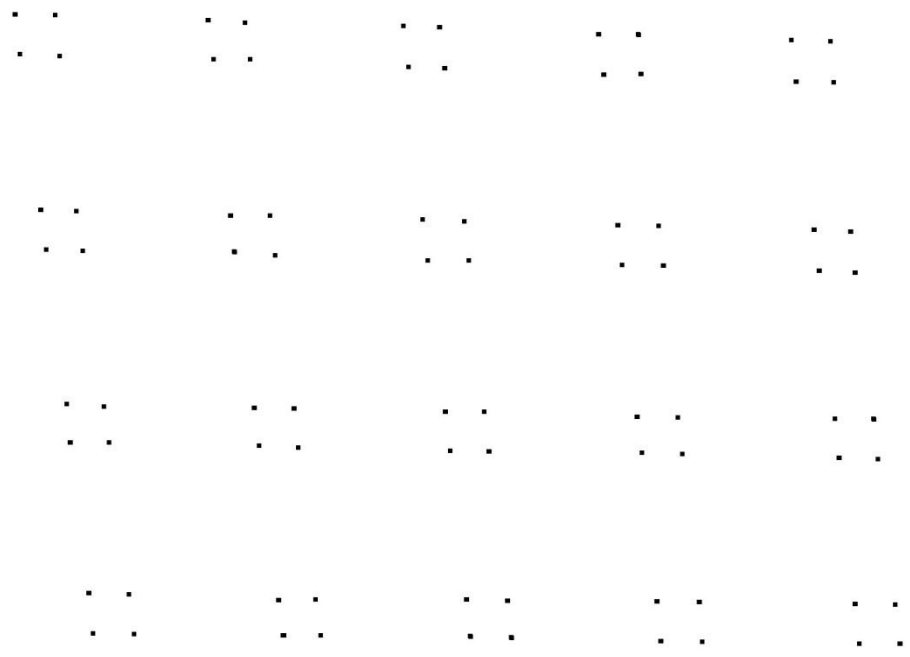

Abb. 7-16 Schnittpunkte der Ränder der Kalibrierstreifen (vergrößerter Ausschnitt).

[122] Um zu vermeiden, dass kein Schnittpunkt gefunden wird (aufgrund von Ecken im Linienzug), wird die UND-Operation auf leicht vergrößerten Pixeln ausgeführt.

[123] 1 entspricht weiß, 0 entspricht schwarz. Die Abbildungen wurden aus Gründen der besseren Sichtbarkeit invertiert.

[124] Entspricht einer Multiplikation.

Um den Schnittpunkt im Zentrum der Streifenpaare zu bestimmen, werden die vier Schnittpunkte miteinander zum Schnittpunkt *s* arithmetisch gemittelt.

Wurden lediglich ein Pixel breite Kalibrierstreifen projiziert, ist der Einfluss einer perspektivischen Verzerrung auf den Schnittpunkt s_x, s_y vernachlässigbar. Werden allerdings dickere Kalibrierstreifen projiziert, und erfolgt die Aufnahme oder Projektion aus einem sehr steilen Winkel, hat die perspektivische Verzerrung einen Einfluss auf die Position eines Schnittpunktes, da die echte Position nicht mehr der Mittelwert der vier Randschnittpunkte ist. Die Korrektur der perspektivischen Verzerrung erfolgt entweder durch eine Homographie-Transformation (siehe Kapitel 7.1.3.1) oder durch Benutzung des Schwerpunktes der Schnittfläche, welche sich leicht aus den vorhandenen Daten bestimmen lässt. Dieser Schwerpunkt approximiert den realen Schnittpunkt *s* sehr gut.

Seien f_{up}, f_{down}, f_{right} und f_{left}, die gefilterten Ränder zweier sich kreuzender Kalibrierstreifen, so ist die Schnittfläche *M* (siehe Formel 7-20 und Abb. 7-17) die Schnittmenge der Punktmengen nach Formel 7-21. Der Schnittpunkt wird per Durchschnittsbildung aller *n* Pixel in *M* berechnet (siehe Formel 7-22).

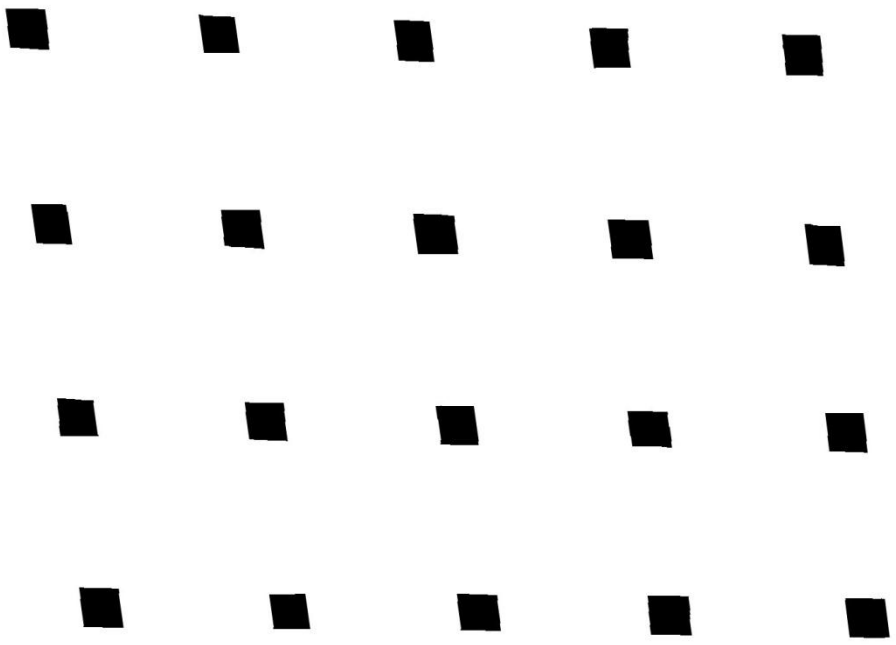

Abb. 7-17 Schnittfläche der Kalibrierstreifen (vergrößerter Ausschnitt).

$$M = M_{down} \cap M_{up} \cap M_{left} \cap M_{right}$$

Formel 7-20 Schnittfläche der gefilterten Kalibrierstreifen.

$$M_{down} = \{(x,y) \mid y \leq f_{up}(x)\}$$
$$M_{up} = \{(x,y) \mid y \geq f_{down}(x)\}$$
$$M_{left} = \{(x,y) \mid x \leq f_{right}(y)\}$$
$$M_{right} = \{(x,y) \mid x \geq f_{left}(y)\}$$

Formel 7-21 Punktmengen unter, über, links bzw. rechts eines gefilterten Kalibrierstreifens.

$$s = \frac{\sum_i M_i}{n}$$

Formel 7-22 Schnittpunkt einer Schnittfläche.

Die berechneten Schnittpunkte werden für jeden Projektor in einer zweidimensionalen Matrix M_S[125] abgelegt. $M_S(i,j)$ und $s_{i,j}$ sind der Schnittpunkt des vertikalen Kalibrierstreifens *i* und des horizontalen Kalibrierstreifens *j*.

$$M_S = \begin{bmatrix} s_{0,0} & \cdots & s_{n-1,0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{0,m-1} & \cdots & s_{n-1,m-1} \end{bmatrix}$$

Formel 7-23 Matrix aller berechneten Schnittpunkte.

Alternativ lässt sich für die Erkennung der Schnittpunkte ein gradientenbasiertes Verfahren einsetzen. Dazu wird jeweils das Bild der horizontalen Kalibrierstreifen mit dem Bild der vertikalen Kalibrierstreifen multipliziert (bzw. die gefilterten Mittelachsen). Die Schnittpunkte der Kalibrierstreifen sind als deutliche lokale Maxima der Gradienten in Abb. 7-18 erkennbar.

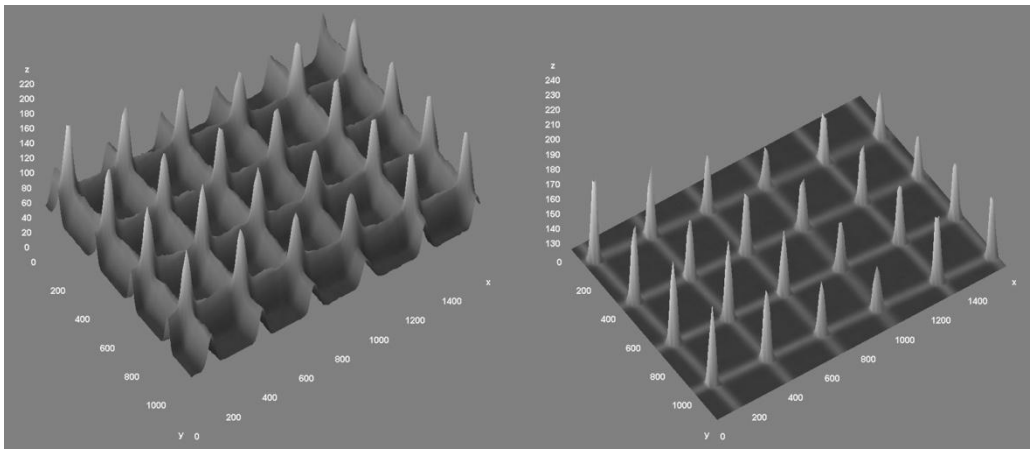

Abb. 7-18 Schnittpunktbestimmung mittels Gradienten.

[125] Die hier und im Folgenden verwendeten Speichermatrizen orientieren sich in ihrer Indizierung an der Indizierung von Bildschirmpixeln, wie sie beispielsweise von DirectX verwendet wird. D.h., der Eintrag *M(0, 0)* ist links oben in der Matrix angeordnet; der Eintrag *M(2, 3)* entspricht dem Element in Spalte 2 und Zeile 3 der Matrix.

7.1.3.1 Die Homographie Transformation

Eine Homographie- bzw. Projektive Transformation überträgt eine Quellebene in eine Zielebene (Agarwal 2005). Diese Technik kann beispielsweise für die Fassadenrekonstruktion verwendet werden (Mützel 2009). Dabei werden die vier Eckpunkte einer in einem Foto perspektivisch verzerrt abgebildeten Fassade markiert. Des Weiteren wird ein Zielrechteck angegeben. Diese jeweils vier Punkte spannen eine ROI auf. Mit Hilfe der Homographie-Transformation wird die perspektivisch verzerrte Fassade in eine unverzerrte Abbildung[126] transformiert. Es handelt sich hierbei um eine „Digital Planar Rectification" (Rodehorst 2008).

In dieser Arbeit werden analoge Probleme betrachtet – sämtliche Quellebenen sind Vierecke, alle Zielebenen sind Rechtecke. Dieses Verfahren kann somit hier eingesetzt werden. Eine mögliche Vorgehensweise zur Bestimmung der Homographie-Matrix *H* ist die Direct Linear Transformation (DLT) (Dubrofsky 2009). Gegeben seien die homogenen Quell- und Zielkoordination *P* und *P'*.

$$P' = H \cdot P$$

mit

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \\ h_4 & h_5 & h_6 \\ h_7 & h_8 & h_9 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Formel 7-24 Homographie-Transformation mit homogenen 2D-Koordinaten.

Aus Formel 7-24 lassen sich *x'* und *y'* wie folgt bestimmen:

$$x' = \frac{h_1 \cdot x + h_2 \cdot y + h_3}{h_7 \cdot x + h_8 \cdot y + h_9}$$
$$y' = \frac{h_4 \cdot x + h_5 \cdot y + h_6}{h_7 \cdot x + h_8 \cdot y + h_9}$$

Formel 7-25 Explizite Repräsentation von x' und y'.

Formel 7-25 lässt sich folgendermaßen umformulieren.

$$0 = x' \cdot (h_7 \cdot x + h_8 \cdot y + h_9) - (h_1 \cdot x + h_2 \cdot y + h_3)$$
$$0 = y' \cdot (h_7 \cdot x + h_8 \cdot y + h_9) - (h_4 \cdot x + h_5 \cdot y + h_6)$$

Formel 7-26 Nullstellen nach Umformulierung.

Für jedes der vier gegebenen Punkte-Paare kann Formel 7-26 in bekannte und unbekannte Parameter aufgeteilt werden.

[126] Dieselbe Fassade von vorne betrachtet.

$$A_i \cdot h = 0$$

mit

$$A_i = \begin{pmatrix} -x & -y & -1 & 0 & 0 & 0 & x'x & x'y & x' \\ 0 & 0 & 0 & -x & -y & -1 & y'x & y'y & y' \end{pmatrix}$$

und

$$h = (h_1 \quad h_2 \quad h_3 \quad h_4 \quad h_5 \quad h_6 \quad h_7 \quad h_8 \quad h_9)^T$$

Formel 7-27 Trennung in bekannte und unbekannte Parameter.

Jede Punktkorrespondenz $P \rightarrow P'$ weist somit zwei Gleichungen auf. Die vier A_i können übereinander „gestapelt" werden. Somit entsteht aus den vier 9×2 Matrizen eine 9×8 Matrix. Dieses linear-homogene Gleichungssystem kann mit dem Gauß'schen Eliminationsverfahren oder der Singular Value Decomposition (SVD[127]) (Bebis 2003) gelöst werden. Aufgrund von Fehlern in den Quellpunkten muss das Ergebnis von Formel 7-27 minimiert werden.

$$A \cdot h \leq \varepsilon$$

Formel 7-28 Linear-homogenes Gleichungssystem mit Fehler.

Somit können die unbekannten Parameter in *h* bestimmt werden, aus denen die Homographie-Matrix *H* bzw. H^{-1} gebildet werden kann[128].

Mit der so gefundenen Homographie-Matrix wird das Viereck, das durch die vier Schnittpunkte s_1 bis s_4 definiert ist, in ein Rechteck transformiert. In diesem Rechteck wird der Schnittpunkt wiederum gemittelt. Dieser Schnittpunkt wird anschließend in das durch s_1 bis s_4 beschriebene Viereck mit Hilfe der inversen Homographie-Matrix zurücktransformiert[129] (siehe Abb. 7-19). Dies kann unter der Annahme erfolgen, dass diese Schnittpunkte selbst bei einer beliebig verformten Projektionsfläche aufgrund des relativ geringen Abstandes zueinander in einer Ebene liegen.

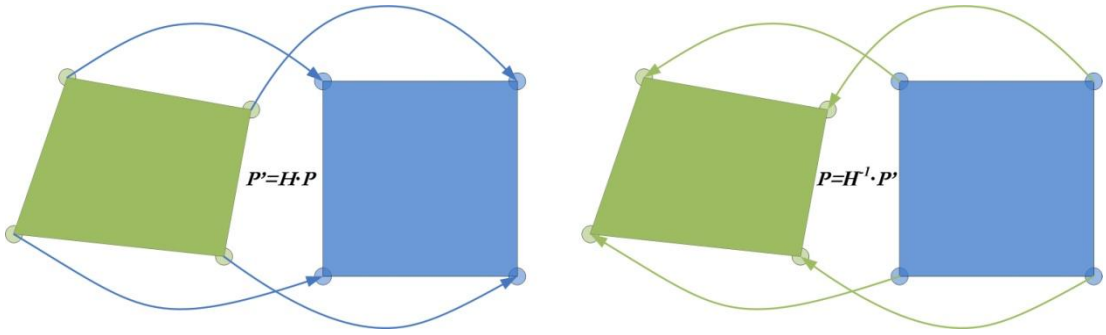

Abb. 7-19 Homographie-Transformation und inverse Homographie-Transformation.

[127] Auch Singulärwertzerlegung.

[128] Eine Implementierung der DLT wird beispielsweise von OpenCV bereitgestellt.

[129] Kann die Inverse aufgrund det(H) = 0 nicht bestimmt werden, wird auch hier die DLT angewendet.

7.1.3.2 Korrektur der radialen Linsenverzerrung

Die bisher beschriebenen Verfahren zur Schnittpunktbestimmung gehen davon aus, dass keine radiale Linsenverzerrung[130] auftritt. In der Praxis ist dieser Einfluss allerdings nicht zu vernachlässigen. Wird die Linsenverzerrung nicht korrigiert, tritt eine inverse Verzerrung im korrigierten Bild auf (siehe Abb. 7-20)[131]. Diese kann je nach Stärke äußerst störend wirken.

Aus diesem Grund muss der Einfluss der radialen Linsenverzerrung bei der Berechnung der Schnittpunkte korrigiert werden. Beim zuerst vorgestellten Verfahren erfolgt die Korrektur der Linsenverzerrung direkt im Anschluss an die Schnittpunktberechnung.
Bei der Verwendung der Homographie Transformation müssen die vier Schnittpunkte s_1 bis s_4 vor der Transformation zum Rechteck entzerrt werden. Bei der Bestimmung des Schwerpunktes von *M* müssen sämtliche Pixel in *M* vor der Bestimmung des Durchschnitts einer Korrektur unterzogen werden.

Da bei diesem Verfahren im Gegensatz zu den anderen in dieser Arbeit vorgestellten Algorithmen (siehe 4.1.2 und 4.1.3) kein Vorwissen über die Projektionsfläche vorhanden ist, kann keine ad Hoc Linsenentzerrung stattfinden. Die Parameter für die Linsenentzerrung werden daher mit Hilfe eines Kalibrierkörpers berechnet (Tsai 1986; Zhang 1999).

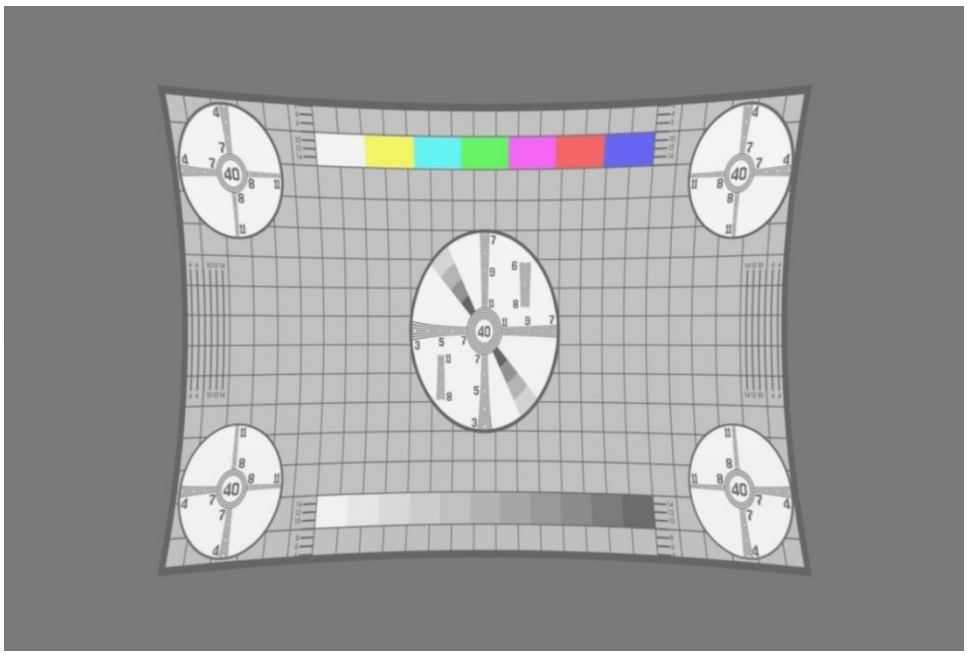

Abb. 7-20 Inverse Linsenverzerrung einer korrigierten Projektion.

[130] Bezieht sich hier und im Folgenden immer auf die Linsenverzerrung der Kamera.

[131] Dies liegt daran, dass bei der Bestimmung der Warping-Parameter davon ausgegangen wird, dass die Schnittpunkte nicht verzerrt sind.

Nachfolgend wird ein einfaches, aber effizientes Verfahren zur Korrektur der kamerabedingten Linsenverzerrung beschrieben. Das Verfahren kommt mit lediglich einer Aufnahme einer Testtafel aus und bestimmt die radialen Entzerrungskoeffizienten[132] erster und zweiter Ordnung, mit Hilfe derer der Einfluss der Linsenverzerrung für beliebige Bilder[133] korrigiert wird.

Die Testtafel beinhaltet Marker, die in regelmäßigen Abständen in Zeilen und Spalten angeordnet sind (siehe Abb. 7-21). Bei diesen Markern kann es sich beispielsweise um schwarze Kreise, Rechtecke oder Kreuze handeln, die auf eine planare weiße Fläche[134] gedruckt sind.

Diese Zeilen und Spalten sind auf der Testtafel so angeordnet, dass sie sich zu parallelen Strecken verbinden lassen. Wird diese Tafel mit einer idealen Kamera ohne Linsenverzerrung fotografiert, wirkt sich nur die perspektivische Verzerrung auf die Aufnahme aus. Aufgrund der perspektivischen Konvergenz werden zwar die parallelen Strukturen aufgehoben, die Verbindungen zwischen den Markern bilden aber immer noch Strecken. In Abb. 7-22 wurde eine dieser Strecken grün markiert.

Wird die Testtafel mit einer Kamera fotografiert, die eine Linsenverzerrung aufweist, weicht das fotografierte Bild deutlich vom Ideal ab. Die roten Strecken in Abb. 7-23 stellen diese Abweichungen für eine Zeile von Markern dar. Ziel des hier vorgestellten Verfahrens ist es, die Summe dieser Abweichungen zu minimieren[135].

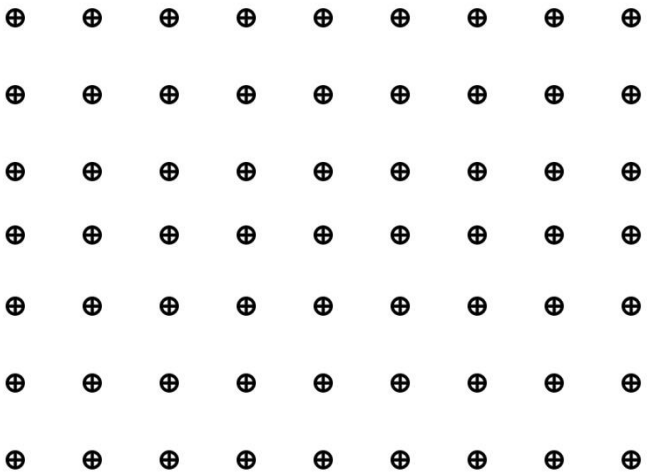

Abb. 7-21 Beispiel einer Testtafel.

[132] Es handelt sich eigentlich um Verzerrungskoeffizienten; da aber die Effekte der Linsenverzerrung korrigiert werden sollen, werden diese Werte auch als Entzerrungskoeffizienten bezeichnet.

[133] Bilder, die mit der Kamera aufgenommen werden, anhand derer die Koeffizienten berechnet wurden.

[134] Z. B. ein Blatt Papier, das auf eine Glasplatte aufgebracht ist.

[135] Im Idealfall – also wenn keinerlei Linsenverzerrung auftritt – beträgt die Abweichung 0.

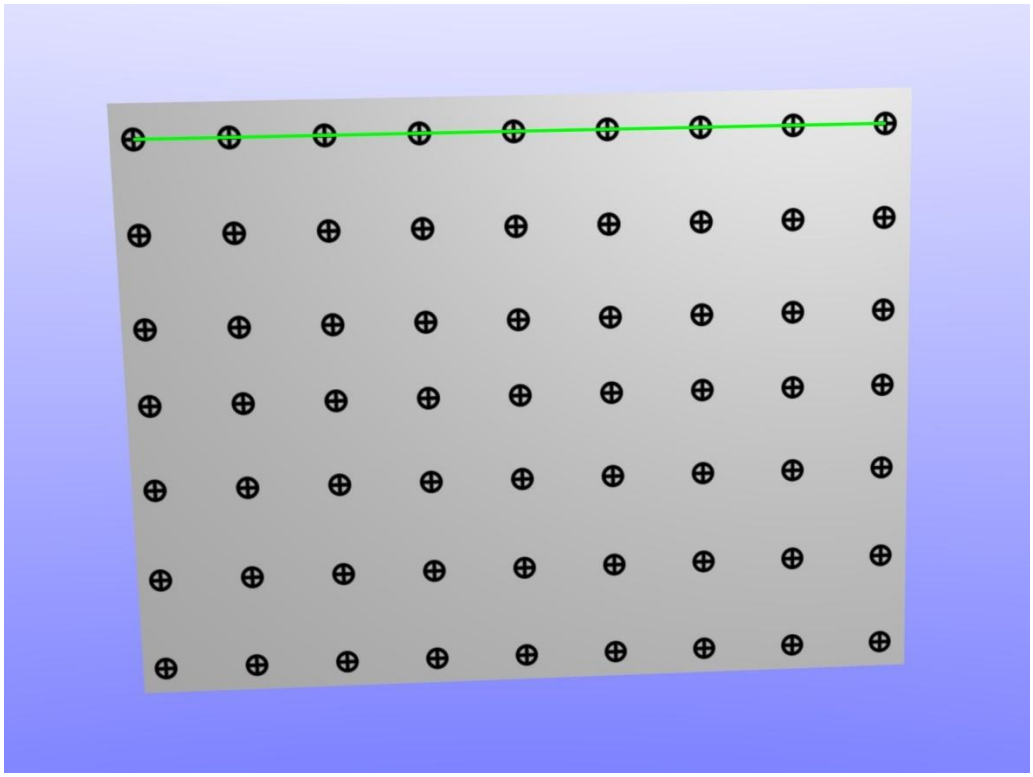

Abb. 7-22 Fotografierte Testtafel ohne Linsenverzerrung.

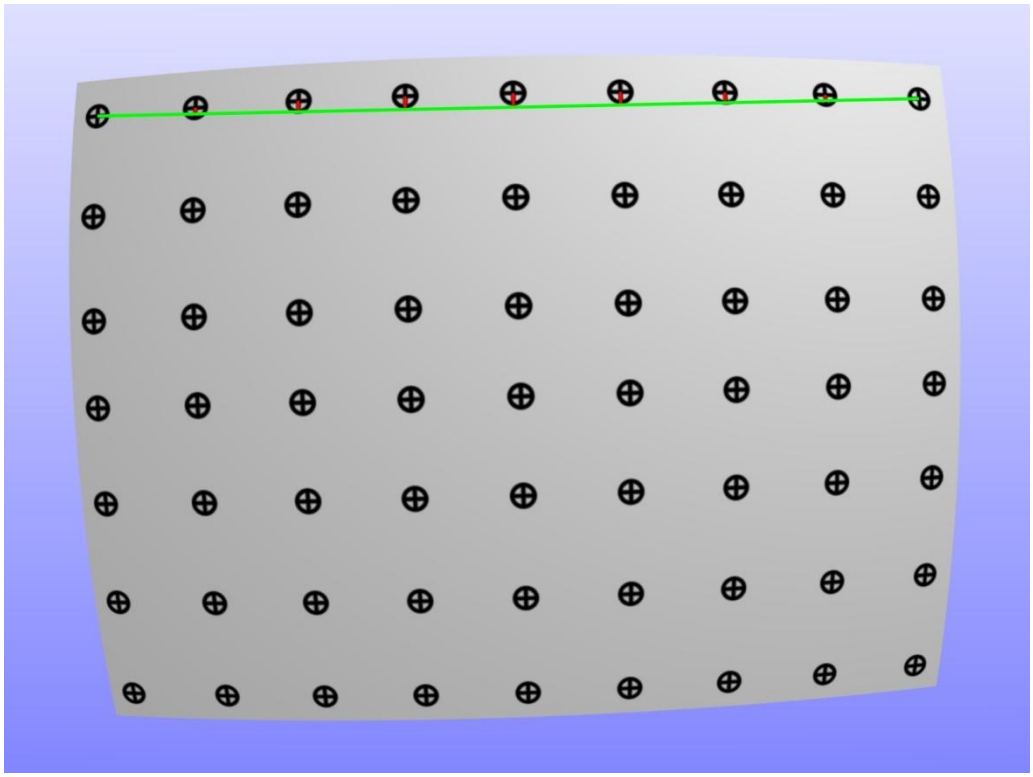

Abb. 7-23 Fotografierte Testtafel mit Linsenverzerrung.

Es sei M_M die Matrix der Pixelpositionen aller fotografierten Marker eines regelmäßigen $n \times m$ Markergrids. $Marker_{i,j}$ und $M_M(i, j)$ geben die fotografierte Position x, y des Markers in Spalte i und Zeile j an[136].

$$M_M = \begin{bmatrix} Marker_{0,0} & \cdots & Marker_{n-1,0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Marker_{0,m-1} & \cdots & Marker_{n-1,m-1} \end{bmatrix}$$

Formel 7-29 Matrix aller fotografierten Marker.

Es sei $M\vec{n}$ die Matrix aller normalisierten Zeilenvektoren und $M\vec{n}(j)$ dieser Vektor $\vec{n}$ für Zeile j.

$$M\vec{n} = \begin{bmatrix} \dfrac{M_M(n-1,0) - M_M(0,0)}{\|M_M(n-1,0) - M_M(0,0)\|} \\ \vdots \\ \dfrac{M_M(n-1,m-1) - M_M(0,m-1)}{\|M_M(n-1,m-1) - M_M(0,m-1)\|} \end{bmatrix}$$

Formel 7-30 Matrix aller normalisierten Zeilenvektoren.

Es sei $M\vec{a}$ die Matrix aller Vektoren vom Startpunkt einer Zeile zu den nachfolgenden Markern in dieser Zeile mit Ausnahme des Endpunktes der Zeile. Die Ausprägung $M\vec{a}(i, j)$ ist dann der Vektor $\vec{a}$ von $M_M(0, j)$ nach $M_M(i+1, j)$.

$$M\vec{a} = \begin{bmatrix} M_M(1,0) - M_M(0,0) & \cdots & M_M(n-2,0) - M_M(0,0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_M(1,m-1) - M_M(0,m-1) & \cdots & M_M(n-2,m-1) - M_M(0,m-1) \end{bmatrix}$$

Formel 7-31 Menge aller Vektoren vom Startpunkt einer Zeile zum aktuell betrachteten Marker dieser Zeile.

Es sei Md die Matrix der Distanzen d vom Startpunkt einer Zeile j bis zum Startpunkt des Vektors, der orthogonal auf dieser Zeile steht und $M_M(i+1, j)$ als Endpunkt hat.

$$Md = \begin{bmatrix} d(0,0) & \cdots & d(n-3,0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d(0,m-1) & \cdots & d(n-3,m-1) \end{bmatrix}$$

mit

$$d(i,j) = M\vec{a}(i,j) \cdot M\vec{n}(j)$$

Formel 7-32 Distanzberechnung mit der Hess'schen Normalform.

[136] Die Filterung der Marker erfolgt wie im vorigen Kapitel beschrieben. Um eine Übertragbarkeit auf beliebige Auflösungen der Kamera zu gewährleisten, wird die Position hier auf einen Wertebereich von (-0.5, -0.5) bis (0.5, 0.5) normalisiert. (0.0, 0.0) liegt somit im Zentrum der Aufnahme.

Es sei *Ms* die Matrix der orthogonalen Abweichungen der Marker von der jeweiligen Zeile.

$$Ms = \begin{bmatrix} s(0,0) & \cdots & s(n-3,0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s(0,m-1) & \cdots & s(n-3,m-1) \end{bmatrix}$$

mit

$$s(i,j) = \sqrt{\|M\vec{a}(i,j)\|^2 - Md(i,j)^2}$$

Formel 7-33 Menge aller Abweichungen von den Zeilen.

Die Summe Δ aller Abweichungen *s* wird anhand Formel 7-34 bestimmt.

$$\Delta = \sum_{i=0}^{n-3} \sum_{j=0}^{m-1} s(i,j)$$

Formel 7-34 Summe aller Abweichungen vom Ideal.

Die soeben beschriebenen Beziehungen zwischen Markern, ihren Vektoren und der gesuchten Abweichung vom Ideal werden in Abb. 7-24 beispielhaft dargestellt.

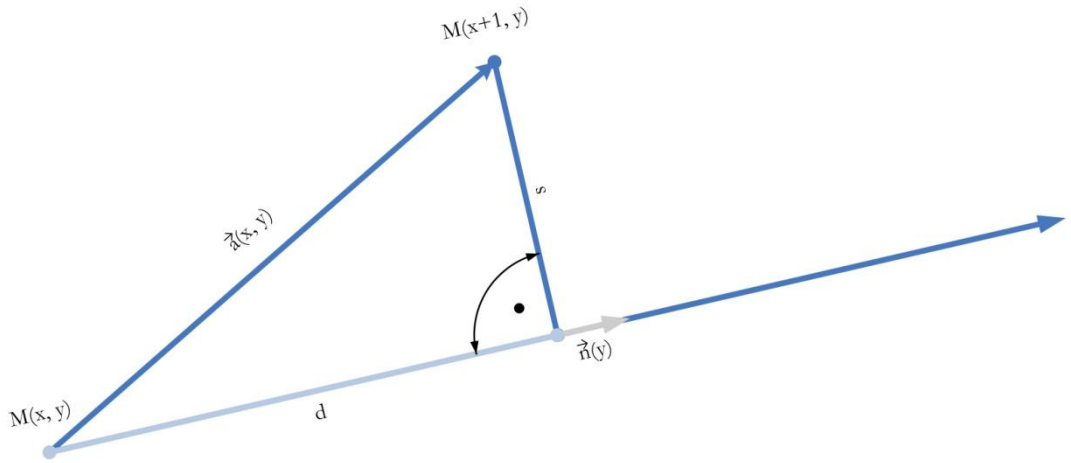

Abb. 7-24 Bestimmung der Abweichung der Marker vom Ideal mit der Hess'schen Normalform.

Da die Linsenverzerrung – wie nachfolgend gezeigt wird – eine radiale Abweichung darstellt, spielt es keine Rolle, ob die Abweichungen von den Zeilen oder den Spalten betrachtet werden. Die Herleitung für Spalten würde analog der hier beschriebenen Vorgehensweise für Zeilen erfolgen.

Die bestimmte Summe aller Abweichungen Δ muss für die Kompensation der Linsenverzerrung minimiert werden. Beträgt Δ null, weist die Fotografie des Testbildes keine Linsenverzerrung auf. Zur Minimierung von Δ wird ein Optimierungsverfahren eingesetzt.

Die Optimierung erfolgt anhand eines radialen Linsenmodells (Formel 7-35).

$$x' = x + x \cdot D$$
$$y' = y + y \cdot D$$
mit
$$D = \kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4$$
mit
$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Formel 7-35 Modell für radiale Verzerrung.

Zur Bestimmung eines verzerrten Punktes *x', y'* wird der unverzerrte Punkt *x, y* mit einem Verzerrungsanteil $x \cdot D$ summiert[137], der vom Abstand zum Zentrum *r* und den Koeffizienten κ_1 und κ_2 abhängt. Ist *D* positiv, ist der verzerrte Punkt weiter vom Zentrum entfernt als der unverzerrte Punkt. Das Bild wird nach außen verzerrt – es tritt eine Barrel-Verzerrung[138] auf. Weist *D* einen negativen Wert auf, ist der verzerrte Punkt dichter am Zentrum als der unverzerrte Punkt. Diese Verzerrungsart wird als Pincushion-Verzerrung[139] bezeichnet.

Die Linsensysteme in handelsüblichen Kameras weisen üblicherweise eine Barrel-Verzerrung auf. Somit lässt sich diese Art der Verzerrung durch eine Pincushion-Verzerrung korrigieren. Im Rahmen der Optimierung werden die Verzerrungskoeffizienten κ_1 und κ_2 bestimmt, die die auftretende Verzerrung ausgleichen. Die Optimierung erfolgt mit einem Greedy-Verfahren[140] (siehe Abb. 7-25). Dabei werden zuerst eine Schrittweite ε sowie die Abbruchschwelle *threshold* festgelegt und κ_1 und κ_2 mit 0.0 initialisiert. Als Folgezustände werden die vier Nachbarn der Vierer-Nachbarschaft von κ_1, κ_2 – mit Schrittweite ε – betrachtet. Als Bewertungsfunktion werden die Formel 7-34 und die Formel 7-35 genutzt. Vom Paar κ_1, κ_2, das das geringste Δ aufweist, werden wiederum die Folgezustände bestimmt. Ist Δ kleiner der Schwelle *threshold,* oder ist das Optimum erreicht[141], wird der Algorithmus abgebrochen.

Mit Hilfe der so bestimmten Entzerrungskoeffizienten κ_1, κ_2 kann der Effekt der Linsenverzerrung korrigiert werden. Formel 7-35 kann nun zur Entzerrung sämtlicher Bildpixel verwendet werden. Für die folgenden Schritte der Kalibrierung werden aber lediglich die Schnittpunkte der Kalibrierstreifen korrigiert.

Die so bestimmten Schnittpunkte in M_S werden für jeden Projektor separat gespeichert.

---

[137] Bei qualitativ minderwertigen Objektiven muss zusätzlich noch die Abweichung vom Zentrum des Bildsensors beachtet werden. Da diese bei den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Objektiven nicht auftrat und der radiale Verzerrungsanteil den größten Einfluss hat, wurde hier darauf verzichtet.

[138] Wird auch als Tonnen-Verzerrung bezeichnet.

[139] Wird auch als Kissen-Verzerrung bezeichnet.

[140] Wird auch als Hillclimbing bezeichnet. Bei Greedy-Algorithmen werden verschiedene Folgezustände betrachtet, die mit einer Bewertungsfunktion untersucht werden. Vom Folgezustand mit dem besten Ergebnis hinsichtlich dieser Bewertungsfunktion werden wiederum die Folgezustände betrachtet (Rekursion). Der Algorithmus terminiert, wenn ein Optimum bzw. eine Schwelle erreicht wird.

[141] Sämtliche Nachfolge-Δ sind größer als das zuletzt bestimmte Δ.

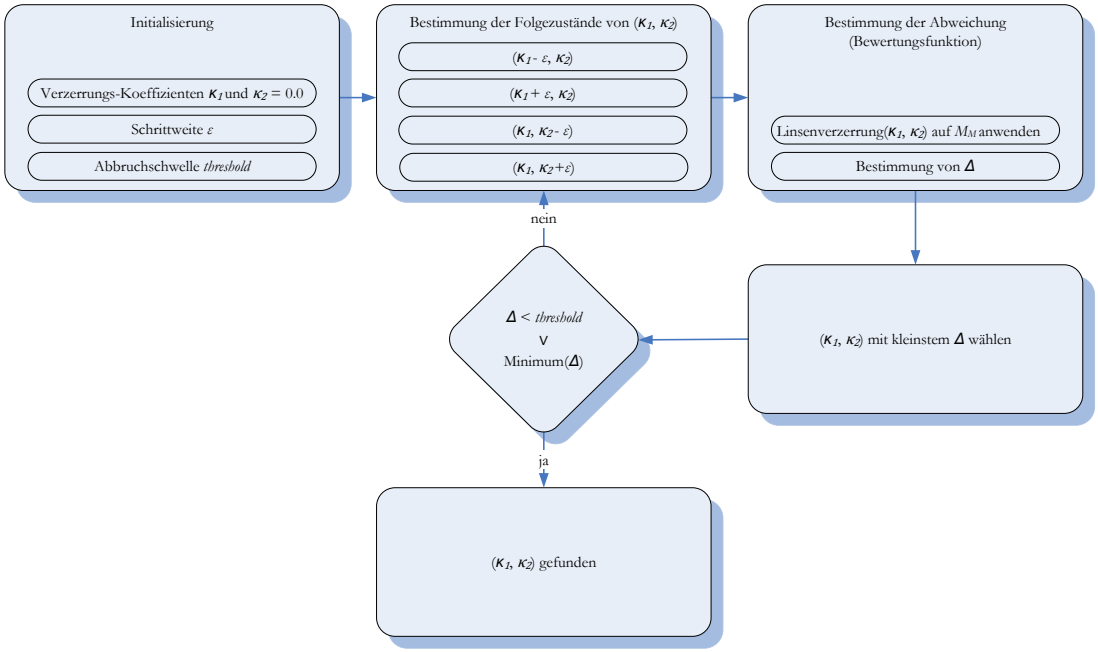

Abb. 7-25 Optimierung der Verzerrungskoeffizienten mittels Greedy-Verfahren.

7.1.4 Bestimmung der größtmöglichen Projektionsfläche

Ziel einer jeden Kalibrierung sollte es sein, die kalibrierte Projektionsfläche so groß wie möglich zu gestalten. Dies kann einerseits durch sorgfältige Aufstellung der Projektoren[142], andererseits durch eine Optimierung der Größe der kalibrierten Projektionsfläche innerhalb aller Teilprojektionen erfolgen. Bei den im Kapitel 4 vorgestellten Verfahren treten generell drei Grundtypen für die Anordnung der Teilprojektionen auf:

- Windowing: Es tritt keinerlei Überlappung auf (Abb. 7-26)[143].
- Mosaicking: Es tritt eine leichte Überlappung auf (Abb. 7-27).
- Stacking: Es tritt eine nahezu totale Überlappung auf (Abb. 7-28).

Beim Windowing[144] kann man sich die Projektoren oder Monitore als Fenster in eine größere virtuelle Welt vorstellen. Die Ränder der Monitore bzw. die Zwischenräume zwischen den Teilprojektionen entsprechen den Fensterkreuzen[145]. Windowing kann beispielsweise für Kunstprojekte oder für Spiele (Sabri 2007; Savov 2010; Matrox) genutzt werden[146].

[142] Um eine große resultierende Gesamtprojektionsfläche zu erreichen, sollten die Projektoren beispielsweise nicht zu stark gegeneinander rotiert sein.

[143] Ein Sonderfall ist das Hardedge-Blending, bei dem die einzelnen Teilprojektionen direkt aneinander grenzen.

[144] Wird auch als Bezel-Management bezeichnet.

[145] Diese müssen nicht rechtwinklig zueinander angeordnet sein.

[146] Die Fenstermetapher kann durch eine blickwinkelabhängige Sicht der Inhalte – durch Head-Tracking – sogar noch verbessert werden (Lee 2008a; 2008b).

Wie bereits erwähnt, sind typische Anwendungsbeispiele für das Mosaicking die Erhöhung der Auflösung; Stacking wird aus Redundanzgründen, zur Erhöhung der Leuchtstärke bzw. für 3D-Stereo-Installationen eingesetzt.

Eine Kombination dieser drei Grundtypen ist natürlich auch möglich. In den folgenden Abbildungen werden die drei Grundtypen dargestellt[147].

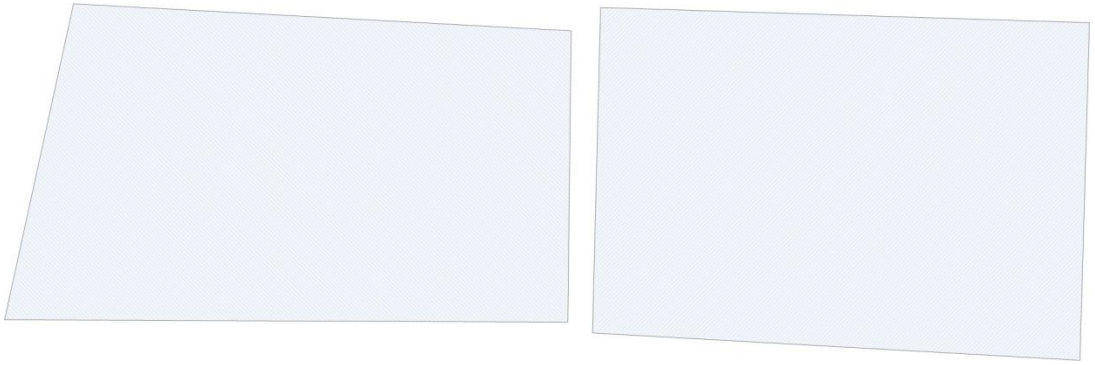

Abb. 7-26 Windowing: keinerlei Überlappung der Projektionsflächen.

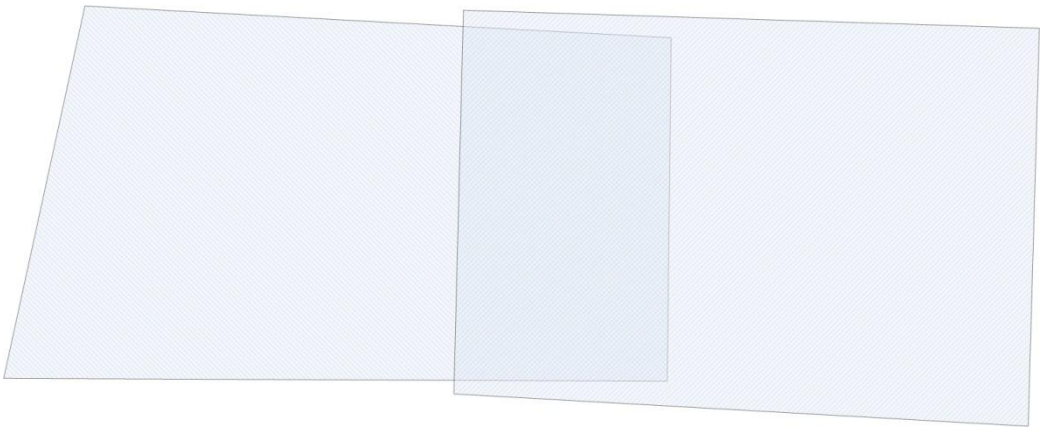

Abb. 7-27 Mosaicking: leichte Überlappung der Projektionsflächen.

Abb. 7-28 Stacking: starke Überlappung der Projektionsflächen.

[147] Die Anzahl der Projektoren ist dabei natürlich nicht auf zwei limitiert.

Im Rahmen dieses Kapitels werden lediglich rechteckige Projektionsflächen betrachtet[148]. Daraus ergibt sich folgende Typisierung der kalibrierten Gesamtprojektionsfläche:

- Einhüllende: größte umschließende Projektionsfläche (Abb. 7-30).
- Vereinigung: größte vereinigte Projektionsfläche (Abb. 7-31).
- Schnitt: größte gemeinsame Projektionsfläche (Abb. 7-32).

Die Anordnung der Projektionsfläche kann durch globale oder lokale Optimierungsstrategien erreicht werden. Dies soll anhand einer gewünschten geschnittenen kalibrierten Projektionsfläche erläutert werden (Abb. 7-29). Bei der globalen Optimierung weist die gefundene Fläche die maximal mögliche Fläche im gewünschten Seitenverhältnis 16:9 auf (khakifarbenes Rechteck). Bei der lokalen Optimierung wird zuerst das größte Rechteck innerhalb der Projektionsfläche bestimmt (hellblaue Fläche). Diese Fläche wird anschließend zentriert ins verlangte Seitenverhältnis von 16:9 gebracht (dunkelblaue Fläche). Wie an diesem Beispiel leicht ersichtlich ist, ist die kalibrierte Projektionsfläche aufgrund der schrägen Überlappung kleiner als die global gefundene Lösung. Die lokale Lösung ist aber unter Umständen aus ästhetischen Gründen zu bevorzugen. Die gefundene Lösung liegt relativ zentral innerhalb der unkalibrierten Teilprojektionen. Somit ist das Restlicht der Projektoren gleichmäßiger um die kalibrierte Projektion verteilt, was unter Umständen als weniger störend wahrgenommen wird.

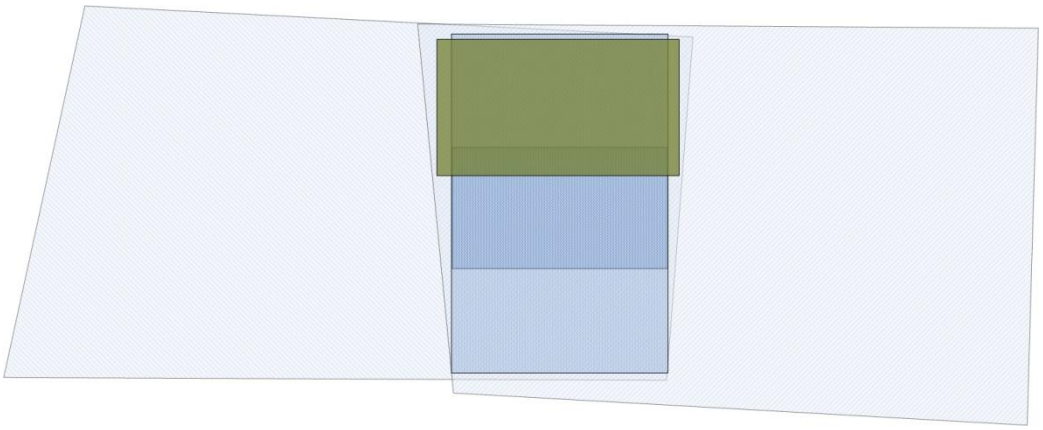

Abb. 7-29 Lokale vs. globale Optimierung.

In den folgenden Abbildungen wird das Ergebnis der lokalen Optimierung[149] anhand der leicht überlappenden Projektion aus Abb. 7-27 dargestellt.

[148] Andere Formen, wie z. B. Firmenlogos, sind natürlich auch denkbar und im Nachhinein durch Stenciling leicht erreichbar. Beim Stenciling wird das Bild mit einer Schablone multipliziert. Grauwerte (Stencil) sind sichtbar, schwarze Bereiche werden ausgeschnitten.

[149] Bei der Einhüllenden entspricht das Ergebnis der lokalen Optimierung dem der globalen Optimierung.

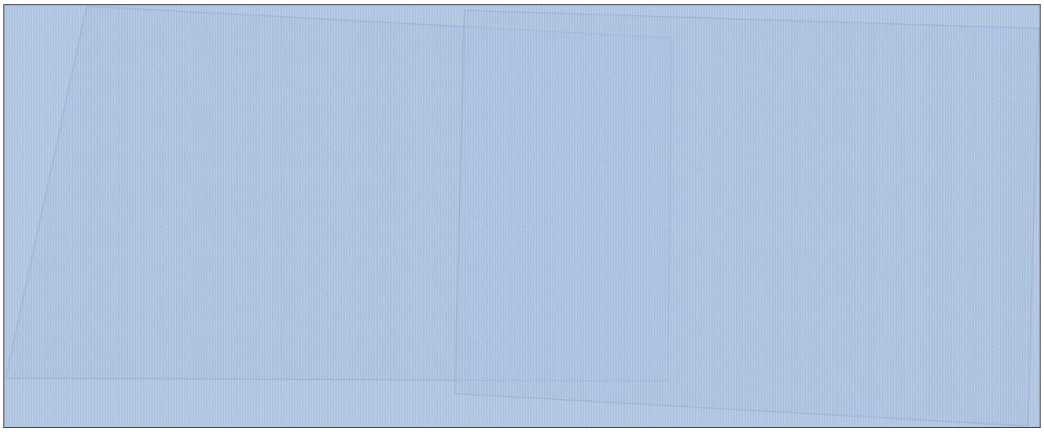

Abb. 7-30 Einhüllende: größte umschließende Projektionsfläche.

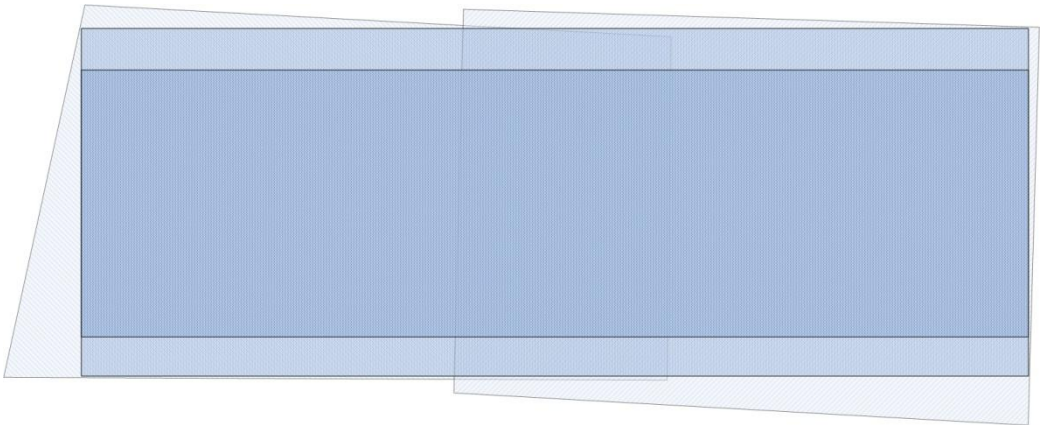

Abb. 7-31 Vereinigung: größte vereinigte Projektionsfläche.

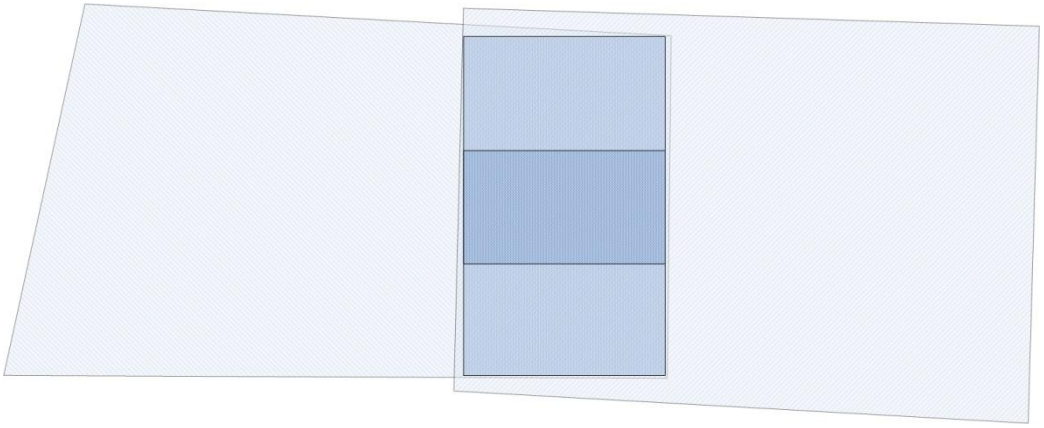

Abb. 7-32 Schnitt: größte gemeinsame Projektionsfläche.

Im Folgenden wird die Bestimmung der lokal optimierten größten Projektionsfläche aufgezeigt. Zuerst wird der Rand jeder Teilprojektionsfläche anhand der $n \times m$ Schnittpunktmatrix M_S bestimmt. Der gesamte Rand ist eine Vereinigung des linken, unteren, rechten und oberen Teilrandes. Ein Teilrand entspricht der Vereinigung aller einfachen Strecken[150] dieses Randes. Eine Strecke ist eine Menge von Punkten *(x, y)*, die beispielsweise mit dem Bresenham-Algorithmus (Bresenham 1965) bestimmt wird. Dieser Rand wird für jede Teilprojektion bestimmt.

$$Margin = Margin_{left} \bigcup Margin_{bottom} \bigcup Margin_{right} \bigcup Margin_{top}$$

mit

$$Margin_{left} = \bigcup_{j=0}^{m-2} \overline{M_S[0,j] M_S[0,j+1]}$$

$$Margin_{bottom} = \bigcup_{i=0}^{n-2} \overline{M_S[i,m-1] M_S[i,m-1]}$$

$$Margin_{right} = \bigcup_{j=m-1}^{1} \overline{M_S[n-1,j] M_S[n-1,j-1]}$$

$$Margin_{top} = \bigcup_{i=n-1}^{1} \overline{M_S[i,0] M_S[i-1,0]}$$

Formel 7-36 Bestimmung des Randes einer Projektionsfläche

Alternativ zur soeben vorgestellten Herangehensweise könnte auch der linke, rechte, obere und untere gefilterte Kalibrierstreifen zur Randbestimmung verwendet werden. Diese Pixelzüge müssten allerdings noch linsenentzerrt werden. Die Benutzung der Schnittpunkte kann aber unter der Voraussetzung erfolgen, dass die Kalibrierstreifen einen so kleinen Abstand *distance* aufweisen, dass die Verbindungen zwischen den Markern Strecken entsprechen[151]. Kann dies nicht gewährleistet werden, sollte ein kleinerer Kalibrierstreifenabstand gewählt werden.

Im nächsten Schritt wird aus den Rändern der Teilprojektionen ein gemeinsamer Rand gebildet. Dazu werden die Teilflächen sukzessive geschnitten (bei Typ Schnitt) bzw. vereinigt (bei Typ Vereinigung und Einhüllende).

Es sei $Margin_i$ der Rand der fotografierten Teilprojektionsfläche *i* und die Anzahl der Teilprojektionen *numProj.* Es sei weiterhin *P* ein Punkt *x, y* in der Menge aller Randpunkte. Es

[150] Die Strecke zwischen einem Marker und dessen Nachfolger.

[151] Das heißt, der gefilterte Kalibrierstreifen, der von einem Schnittpunkt zu seinem Nachbarn führt, entspricht in diesem Intervall in etwa einer Strecke.

sei *inside(Margin$_i$, P)* eine Funktion, die angibt, ob sich *P* innerhalb der Fläche befindet, die von *Margin$_i$* umrandet wird. Dann wird der gemeinsame Rand *Margin* wie folgt bestimmt.

$$Margin = \bigcap_{i=0}^{numProj-1} Margin_i$$

mit

$$Margin_A \cap Margin_B \equiv \left(alle\ P\ in\ Margin_A\ \wedge inside(Margin_B, P)\right) \vee \left(alle\ P\ in\ Margin_B\ \wedge insideMarginA,P\right.$$

Formel 7-37 Gemeinsamer Rand (Typ Schnitt).

$$Margin = \bigcup_{i=0}^{numProj-1} Margin_i$$

mit

$$Margin_A \cup Margin_B \equiv \left(alle\ P\ in\ Margin_A\ \wedge \neg inside(Margin_B, P)\right) \vee \left(alle\ P\ in\ Margin_B\ \wedge \neg insideMarginA,P\right.$$

Formel 7-38 Gemeinsamer Rand (Typ Vereinigung/Einhüllende).

Es sei *Rect* die gesuchte größtmögliche Projektionsfläche aller fotografierten Teilprojektionen. Die Ränder dieses Rechtecks werden für den Typ Einhüllende wie folgt bestimmt.

$$Rect.left = MinX(Margin)$$
$$Rect.right = MaxX(Margin)$$
$$Rect.bottom = MinY(Margin)$$
$$Rect.top = MaxY(Margin)$$

Formel 7-39 Größte Projektionsfläche (Einhüllende).

Für die Projektionstypen Vereinigung und Schnitt muss dieses Rechteck folgendermaßen angepasst werden. Es sei *decrease(Rect)* eine Funktion, die das Rechteck *Rect* an allen Rändern um einen Pixel verkleinert. Es sei *inside(Margin, Rect)* wiederum eine Funktion, die testet, ob das Rechteck *Rect* vollständig innerhalb des Randes *Margin* liegt.

$$Rect = decrease(Rect)$$

solange bis

$$inside(Margin, Rect) == true$$

Formel 7-40 Größte Projektionsfläche (Vereinigung/Schnitt).

Die so lokal gefundene Projektionsfläche weist ein nicht standardkonformes Seitenverhältnis auf. Oftmals ist es wünschenswert, das Seitenverhältnis aus dem Seitenverhältnis der Pro-

jektoren und deren Anordnung[152] oder dem Seitenverhältnis der darzustellenden Inhalte zu bestimmen. Das Seitenverhältnis kann manuell gesetzt oder automatisch bestimmt werden. Es sei *ratio* das gewünschte Seitenverhältnis der kalibrierten Gesamtprojektion und Quotient aus *ratio.x* und *ratio.y*. Die Anpassung der Projektionsfläche *Rect* wird folgendermaßen bestimmt.

$$ratio_{Rect} = \frac{Rect.right - Rect.left}{Rect.top - Rect.bottom}$$

Formel 7-41 Seitenverhältnis des größten Rechtecks.

$$Rect.left = \begin{cases} Rect.left \mathrel{+}= offset, & falls\ ratio < ratio_{rect} \\ Rect.left, & sonst \end{cases}$$

$$Rect.right = \begin{cases} Rect.right \mathrel{-}= offset, & falls\ ratio < ratio_{rect} \\ Rect.right, & sonst \end{cases}$$

mit

$$offset = \frac{(Rect.right - Rect.left) \cdot \left(1 - \frac{ratio}{ratio_{rect}}\right)}{2}$$

$$Rect.bottom = \begin{cases} Rect.bottom \mathrel{+}= offset, & falls\ ratio > ratio_{rect} \\ Rect.bottom, & sonst \end{cases}$$

$$Rect.top = \begin{cases} Rect.top \mathrel{-}= offset, & falls\ ratio > ratio_{rect} \\ Rect.top, & sonst \end{cases}$$

mit

$$offset = \frac{(Rect.top - Rect.bottom) \cdot \left(1 - \frac{ratio_{rect}}{ratio}\right)}{2}$$

Formel 7-42 Anpassung der größten Projektionsfläche (Vereinigung/Schnitt) an ein gewünschtes Seitenverhältnis.

Wie bereits erwähnt, wird mit der soeben gezeigten Vorgehensweise nicht die beste Lösung gefunden. Daher soll nun eine globale Optimierungsstrategie aufgezeigt werden.

Im ersten Schritt der globalen Optimierung erfolgt eine Initialisierung. Die einhüllende Projektionsfläche $Rect_{Envelope}$ wird anhand der Formel 7-39 berechnet. Die Bestimmung des Randes *Margin* erfolgt wiederum mit Hilfe der Formel 7-37 und der Formel 7-38. Die Position der gesuchten Projektionsfläche *Pos* und Pos_{tmp} wird mit dem Schwerpunkt von *Margin* initialisiert. Die gesuchte Projektionsfläche *Rect* und $Rect_{tmp}$ wird anhand von *Pos* mit den kleinstmöglichen Werten initialisiert, die dem gewünschten Seitenverhältnis *ratio* entsprechen.

Im nächsten Schritt wird überprüft, ob die Projektionsfläche $Rect_{tmp}$ innerhalb des Randes

[152] Aus zwei um wenige Prozent überlappenden Projektoren mit dem Seitenverhältnis 4:3 resultiert beispielsweise das Seitenverhältnis 8:3. Ist die Überlappung stärker oder sollen beispielsweise Filme dargestellt werden, wäre ein resultierendes Seitenverhältnis von 16:9 denkbar.

Margin liegt. Ist dies der Fall, werden die aktuelle Position und die aktuelle Projektionsfläche als mögliche finale Lösung gespeichert. Anschließend wird $Rect_{tmp}$ unter Beibehaltung des gewünschten Seitenverhältnisses um den kleinstmöglichen Wert inkrementiert. Liegt $Rect_{tmp}$ nicht vollständig innerhalb von *Margin,* werden rekursiv verschiedene Folgezustände getestet. Dazu wird die gesuchte Projektionsfläche $Rect_{tmp}$ innerhalb der Vierer-Nachbarschaft von Pos_{tmp} verschoben. Als Abbruchbedingung werden Δ_{left}, Δ_{right}, Δ_{bottom} und Δ_{top} hinzugezogen.

$$\Delta_{left} = Rect_{tmp}.left - Rect_{Envelope}.left$$

$$\Delta_{right} = Rect_{Envelope}.right - Rect_{tmp}.right$$

$$\Delta_{bottom} = Rect_{tmp}.bottom - Rect_{Envelope}.bottom$$

$$\Delta_{top} = Rect_{Envelope}.top - Rect_{tmp}.top$$

Formel 7-43 Abbruchkriterium für die Rekursion.

Die Δ geben dabei den Abstand des Randes der gesuchten Projektionsfläche $Rect_{tmp}$ zur einhüllenden Projektionsfläche $Rect_{Envelope}$ an. Ist Δ kleiner null, befindet sich die gesuchte Projektionsfläche $Rect_{tmp}$ in jedem Fall außerhalb des Randes und muss somit nicht weiter betrachtet werden. Die Rekursion endet, wenn alle vier Δ kleiner null sind. Die zuletzt gespeicherte Projektionsfläche *Rect* entspricht der global größtmöglichen Projektionsfläche innerhalb von *Margin* unter Berücksichtigung des Seitenverhältnisses *ratio*.

Gültige und ungültige Positionen werden in Abb. 7-33, der Ablauf des Algorithmus werden in Abb. 7-34 dargestellt.

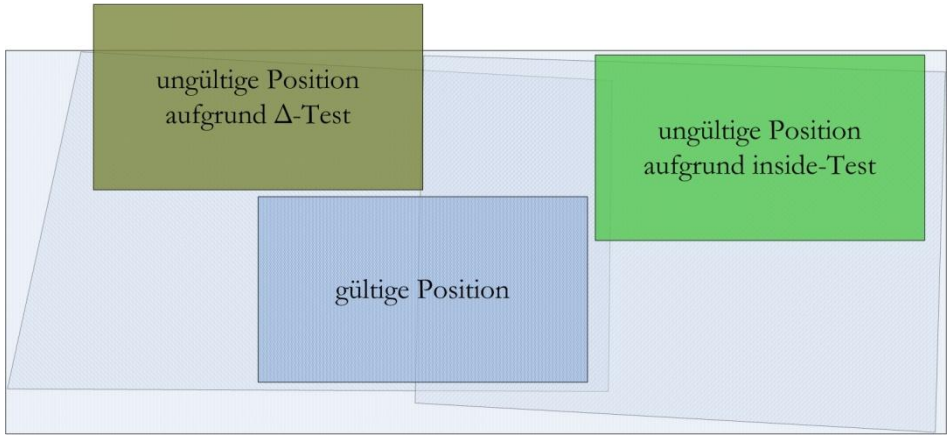

Abb. 7-33 Gültige und ungültige Positionen für $Rect_{tmp.}$

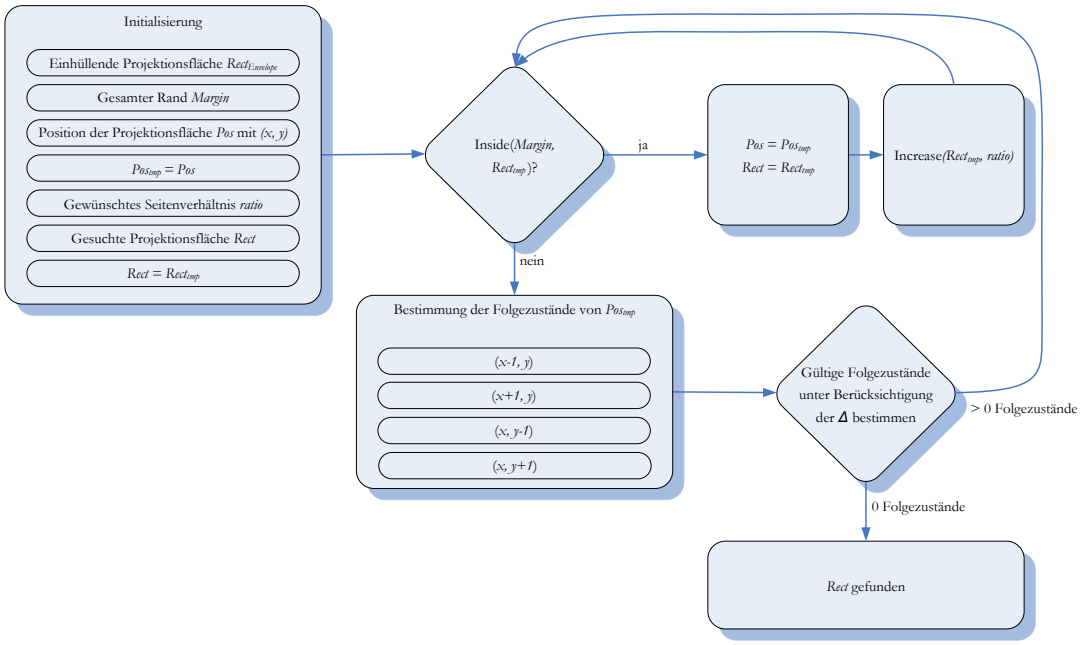

Abb. 7-34 Globale Optimierung der größtmöglichen Projektionsfläche.

7.1.5 Parameter für die Bildkorrektur

Nach dem vorherigen Schritt ist die lokal bzw. global optimierte, größtmögliche – bezüglich der Kamera kalibrierte – Projektionsfläche als Rechteck *Rect* definiert. Die auf der Projektionsfläche verzerrt abgebildeten Bildinhalte (Abb. 7-35) müssen nun so angepasst werden, dass sie perfekt in *Rect* eingepasst sind (Abb. 7-36). Bei einer derartigen Bildkorrektur muss man zwischen zwei Parameterklassen unterscheiden:

- Parameter für den geometrischen Ausgleich (Warping-Parameter)
- Parameter für den Intensitätsausgleich (Blending-Parameter).

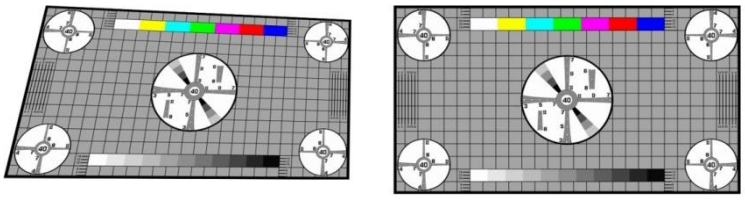

Abb. 7-35 Unkalibriertes Testbild auf der Projektionsfläche und im Framebuffer.

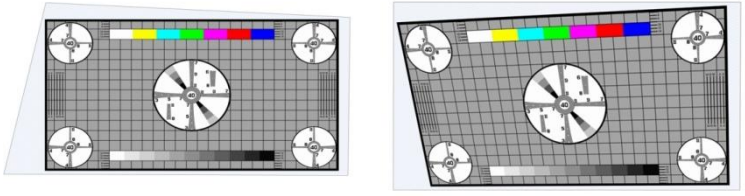

Abb. 7-36 Kalibriertes Testbild auf der Projektionsfläche und im Framebuffer.

7.1.5.1 Warping-Paramter

Die Warping-Parameter sind sogenannte uv-Koordinaten. Diese Koordinaten liegen im Intervall [0.0, 0.0] × [1.0, 1.0] und geben eine 2D-Position innerhalb einer uv-Textur[153] an.

Von den gefilterten Schnittpunkten M_S ist aufgrund des Abstandes der Kalibrierstreifen *distance* bekannt, wo diese im Framebuffer jedes Projektors liegen[154]. Von diesen Schnittpunkten ist weiterhin bekannt, wo sie im Kamerabild und vor allem, wo sie bezüglich der gewünschten kalibrierten Projektionsfläche *Rect* liegen. Wie bereits erwähnt, soll das kalibrierte Bild in *Rect* eingepasst werden. Die linke untere Ecke von *Rect* entspricht somit dem uv-Wert (0.0, 0.0) der darzustellenden Textur. Die rechte obere Ecke hat den uv-Wert (1.0, 1.0). Sämtliche uv-Werte innerhalb und außerhalb von *Rect* können nun analog der folgenden Formeln bestimmt werden. Es seien *P* und *x, y* eine Pixelposition und *Rect* die größtmögliche kalibrierte Projektionsfläche.

$$uv(P) = \{u(P.x), v(P.y)\}$$

mit

$$u(x) = \frac{x - Rect.left}{Rect.right - Rect.left}$$

und

$$v(\mathrm{y}) = \frac{y - Rect.bottom}{Rect.top - Rect.bottom}$$

Formel 7-44 Bestimmung der uv-Werte.

Die Berechnung der uv-Werte betrifft hier lediglich die Schnittpunkte der Kalibrierstreifen. Für jeden Projektor wird eine uv-Matrix für sämtliche Schnittpunkte der Kalibrierstreifen dieses Projektors bestimmt. $M_{uv}(i, j)$ ist dabei die uv-Koordinate für den Schnittpunkt $M_S(i, j)$.

$$M_{uv} = \begin{bmatrix} uv\big(M_S(0,0)\big) & \cdots & uv\big(M_S(n-1,0)\big) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ uv\big(M_S(0,m-1)\big) & \cdots & uv\big(M_S(n-1,m-1)\big) \end{bmatrix}$$

Formel 7-45 Matrix der uv-Werte der Schnittpunkte der Kalibrierstreifen.

Befinden sich die Schnittpunkte innerhalb von *Rect*, so liegen die uv-Werte zwischen 0.0 und 1.0. Befinden sie sich außerhalb der gewünschten Projektionsfläche, sind die uv-Werte kleiner 0.0 bzw. größer 1.0. Das heißt, diese Punkte befinden sich auch außerhalb der darzustellenden Textur (entspricht den hellblauen Bereichen des Framebuffers im rechten Teilbild von Abb. 7-36).

---

[153] Diese Textur entspricht hier dem entzerrt darzustellenden Bild.

[154] Ist *distance* = 30, so liegt $M_S[0,0]$ an Position (0, 0) und $M_S[10,5]$ an Position (300, 150).

Für jeden Schnittpunkt jedes Projektors ist nun ein uv-Texel definiert. Die zwischen diesen uv-Werten liegenden Bildbereiche, deren Pixeln noch keine uv-Werte zugewiesen wurden, werden aus den vorhandenen uv-Werten interpoliert (siehe Kapitel 7.1.6). Werden diese Warping-Parameter auf die Teilprojektionen angewendet, ist das resultierende Bild pixelgenau zwischen verschiedenen Teilbildern und zur gewünschten Projektionsfläche *Rect* ausgerichtet. Bereiche, in denen sich mehrere Teilbilder überlappen, weisen allerdings eine zu hohe Intensität auf (siehe Abb. 4-3).

7.1.5.2 Blending-Parameter

Auf Grund dieser zu hohen Intensität werden im Anschluss die Blending-Parameter bestimmt. Diese Parameter sind Bilder, die jeweils mit dem entsprechenden Framebuffer multipliziert werden. Über die Anordnung der Schnittpunkte verschiedener Teilprojektionen im Kamerabild sowie deren uv-Koordinaten lässt sich bestimmen, welche Bereiche der Teilprojektion sichtbar sind (weiß im Blendbild), welche außerhalb der Projektionsfläche liegen (schwarz im Blendbild) und wo sich Überlappungsbereiche der einzelnen Projektoren befinden (Graukeil im Blendbild).
Bei der Bestimmung der Blendbilder ist wiederum auf die Art der Projektion – Windowing, Stacking, Mosaicking – zu achten.

Beim Windowing müssen die Blendbilder vollständig weiß sein, da die Teilprojektionen keine Überlappungen aufweisen und die darzustellenden Bildbereiche den jeweiligen Framebuffer vollständig ausfüllen.

Beim Stacking sollen Bereiche außerhalb der gewünschten Projektionsfläche entfernt werden. Die Blendbilder müssen dafür im sichtbaren inneren Bereich weiß und im unsichtbaren äußeren Bereich schwarz[155] eingefärbt werden. Dazu wird das Blendbild für jeden Projektor mit schwarz initialisiert. Des Weiteren wird ein weißes uv-Bild erzeugt[156]. Mit Hilfe der zuvor bestimmten uv-Werte (Matrix M_{uv}) wird diese uv-Textur in das schwarz initialisierte Blendbild gewarpt, wodurch der Stencil des betrachteten Projektors erzeugt wird (siehe auch Kapitel 7.1.6).

Beim Mosaicking erfolgt zusätzlich zur Entfernung der Bereiche außerhalb der Projektionsfläche (Stenciling) ein Intensitätsabgleich zwischen den Teilprojektionen, um eine homogene Gesamtintensität zu erzeugen.

---

[155] Dieses so genannte Stenciling ist notwendig, da der Framebuffer im nicht zu rendernden Bereich möglicherweise undefinierte Werte enthält. Durch die Multiplikation mit dem Blendbild werden diese Werte schwarz und sind somit nicht mehr auf der Projektionsfläche sichtbar.

[156] Auch uv-Textur genannt. Diese Textur liegt im Intervall [0.0, 1.0] × [0.0, 1.0] und entspricht der gesuchten Gesamtprojektionsfläche. Um Aliasing-Artefakte zu vermeiden, sollten dieses und nachfolgend beschriebene uv-Bilder eine entsprechende Größe aufweisen.

Im Folgenden soll zuerst näher auf die Erzeugung einer homogenen Gesamtintensität im Überlappungsbereich eingegangen werden, da dessen Darstellung essenziell für die wahrgenommene Qualität der kalibrierten Projektion ist. Ist der Blendbereich zu hell oder zu dunkel, ist leicht erkennbar, dass die Projektion aus mehreren Teilbildern zusammengesetzt ist, was den visuellen Eindruck nachhaltig stört. Die Summe der Intensitätswerte muss also an jeder Stelle im Blendbereich den Maximalwert Eins ergeben. Dies soll nachfolgend für den eindimensionalen Fall für zwei zu blendende Funktionen erläutert werden.

Eine einfache Funktion[157], die diese Randbedingung erfüllt, ist in Formel 7-46 und Abb. 7-41 (Teilbild 1.1) dargestellt.

$$f(x) = x$$
$$g(x) = 1 - x$$

Formel 7-46 Lineare Blendfunktion.

Bei einem idealen Projektor würde diese Blendfunktion zu einem homogenen Blendbereich führen [Abb. 7-41 (Teilbild 2.1)]. Ein realer Projektor stellt die Farbwerte des eingespeisten Bildes allerdings nicht linear dar (Collins 2002). Die Farbwerte werden mit einer Potenzfunktion[158] transformiert, was zu einem sichtbaren dunklen Bereich innerhalb des Blendbereiches führt [Abb. 7-41 (Teilbild 3.1)]. Um diesen Effekt zu kompensieren, muss die Blendfunktion mit dem inversen Gammawert des Projektors potenziert werden [Formel 7-47 und Abb. 7-41 (Teilbild 1.2)].

$$f(x) = x^{1/\gamma}$$
$$g(x) = (1 - x)^{1/\gamma}$$

Formel 7-47 Gammakorrigierte lineare Blendfunktion.

Diese korrigierten Funktionen resultieren beim idealen Projektor in einem zu hellen Blendbereich, weisen jedoch bei einem realen Projektor das korrekte Ergebnis auf [Abb. 7-41 (Teilbilder 2.2 und 3.2)].

Die lineare Blendfunktion sollte allerdings noch weiter verfeinert werden. Idealerweise würde man ein lineares Antwortverhalten der Rezeptoren erwarten. Aufgrund des Machband-Effekts (Mach 1866) treten aber bei der linearen Blendfunktion sichtbare Artefakte auf. Dieses Phänomen umfasst die Wahrnehmung hellerer bzw. dunklerer Intensitätsspit-

[157] f(x) ist die Blendfunktion, g(x) die Inverse von f(x). Der Ein- und Ausgabebereich liegt jeweils im Intervall [0.0, 1.0].

[158] Wird auch als Gammafunktion bezeichnet. Ein üblicher Gammawert schwankt um 2.2. Eine Alternative zur Potenzierung ist die Benutzung einer Look-up-Table.

zen an den Übergängen zwischen hellen und dunklen Gebieten (siehe Abb. 7-37)[159]. Diese Spitzen werden dabei intensiver wahrgenommen, als sie physikalisch messbar sind. Dies liegt darin begründet, dass angrenzende Rezeptoren ihre Nachbarrezeptoren hemmen. Dieses Verhalten kann idealisiert als einfaches neuronales Netz modelliert werden (Abb. 7-38). Die Ausgabe O_i eines Rezeptors I_i lässt sich wie folgt bestimmen.

$$O_i = \sum_{\Delta=-1}^{1} I_{i+\Delta} \cdot w_{i\cdot 3+\Delta}$$

Formel 7-48 Bestimmung der Rezeptorausgabe mit Hilfe eines neuronalen Netzes.

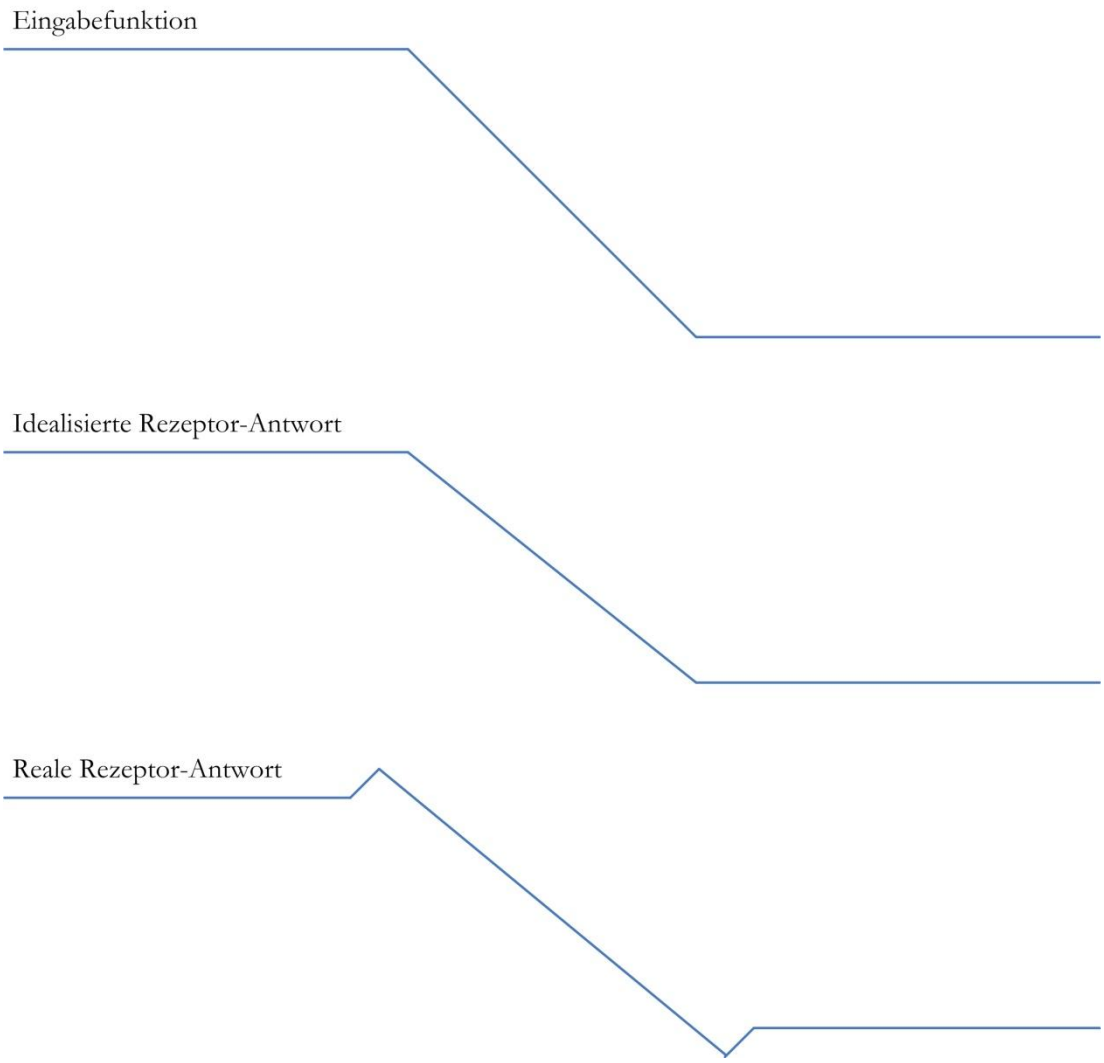

Abb. 7-37 Rezeptorenantwort.

[159] Der Machband-Effekt muss beim Blending betrachtet werden, da die Pixel der Teilprojektionen auf der Projektionsfläche eine gewisse physikalische Ausdehnung haben und aufgrund der beliebigen Anordnung der Projektoren nie perfekt übereinanderliegen werden.

Betrachtet man den Übergang vom weißen Gebiet des Blendbildes zum Graukeil der linearen Blendfunktion aus Formel 7-46[160] mit dem neuronalen Netz, so lässt sich feststellen, dass die intuitiv erwartete Antwort (siehe Abb. 7-39) nicht der wirklichen Antwort der Rezeptoren entspricht (siehe Abb. 7-40, oberes Teilbild). Die Ausgabe des vierten Rezeptors ist mit 0.801 höher als die erwarteten 0.8. Aus diesem Grund wird eine Blendfunktion gesucht, die diesen Effekt minimiert.

Ein deutlich besseres Ergebnis wird mit einer Sinus-Blendfunktion erreicht [Formel 7-49, Formel 7-50 sowie Abb. 7-41 (Teilbilder 1.3, 2.3, 3.3, 1.4, 2.4 und 3.4)].

$$f(x) = sin\left(x \cdot \pi - \frac{\pi}{2}\right) \cdot 0.5 + 0.5$$
$$g(x) = sin\left(-x \cdot \pi + \frac{\pi}{2}\right) \cdot 0.5 + 0.5$$

Formel 7-49 Sinus-Blendfunktion.

$$f(x) = (sin\left(x \cdot \pi - \frac{\pi}{2}\right) \cdot 0.5 + 0.5)^{1/\gamma}$$
$$g(x) = (sin\left(-x \cdot \pi + \frac{\pi}{2}\right) \cdot 0.5 + 0.5)^{1/\gamma}$$

Formel 7-50 Gammakorrigierte Sinus-Blendfunktion.

Diese Funktion minimiert den Machband-Effekt, da der Übergang vom weißen Bereich zum Blendbereich sanfter erfolgt. Betrachtet man wiederum den vierten Rezeptor (Abb. 7-40, unteres Teilbild), sieht man, dass die Hemmung des rechts angrenzenden Rezeptors stärker als beim linearen Blending ausfällt. Dies resultiert in einem geringeren Antwortwert (0.80006). Dieser Wert liegt deutlich näher am idealen Ausgabewert 0.8 als bei der linearen Blendfunktion. Somit ist die Sinus-Blendfunktion bzw. generell sigmoide Blendfunktionen zu bevorzugen.

Der Gamma-Wert, der bei den bisher beschriebenen Blendfunktionen Verwendung findet, kann aus dem Datenblatt der verwendeten Projektoren abgelesen bzw. gemessen werden. Unter Umständen kann es sinnvoll sein, drei Blendfunktionen[161] zu bestimmen, wenn die einzelnen Farbkanäle starke Abweichungen zwischen ihren Gamma-Kurven aufweisen.

Die funktionale Beschreibung der Blendfunktion kann allerdings von der Realität abweichen[162]. In diesem Fall sollte eine Look-up-Table verwendet werden. Theoretisch müsste für jede Farbkombination ein LUT-Wert bestimmt werden. Da sich dies mit vertretbarem Aufwand nicht realisieren lässt, kann man wiederum drei LUTs bestimmen, die für den jeweiligen Farbkanal genutzt werden.

[160] Die Ausgabe der Gammakorrigierten Version auf einem realen Projektor entspricht wiederum dieser Funktion.
[161] Für die drei Primärfarben rot, grün und blau.
[162] Insbesondere, wenn Projektoren über verschiedene Darstellungsmodi, wie z. B. „Cinema“ oder „Präsentation“ verfügen, bei denen verschiedene Gamma-Kurven Anwendung finden.

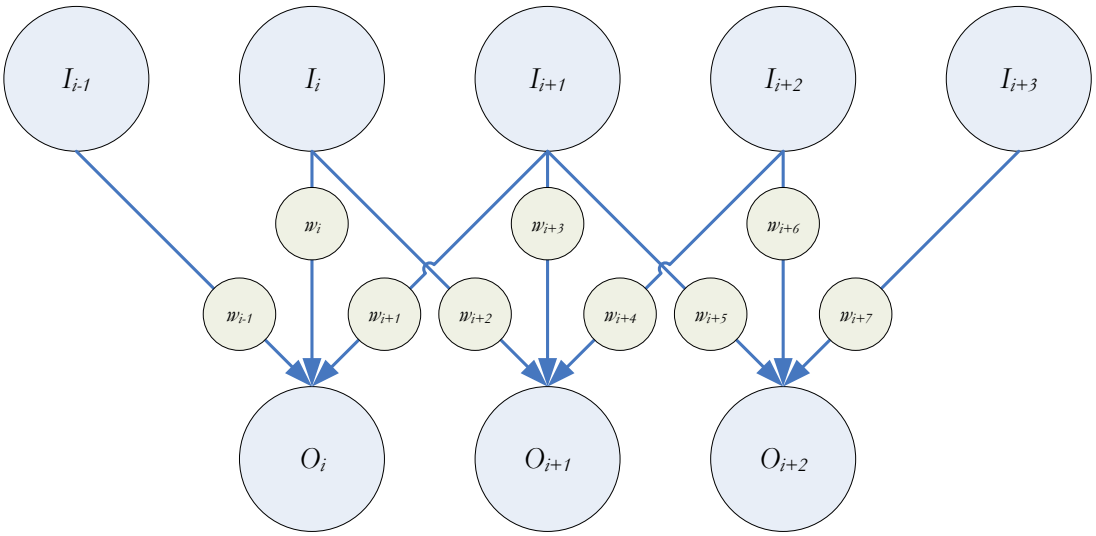

Abb. 7-38 Modellierung der Rezeptorenantwort mit einem neuronalen Netz.

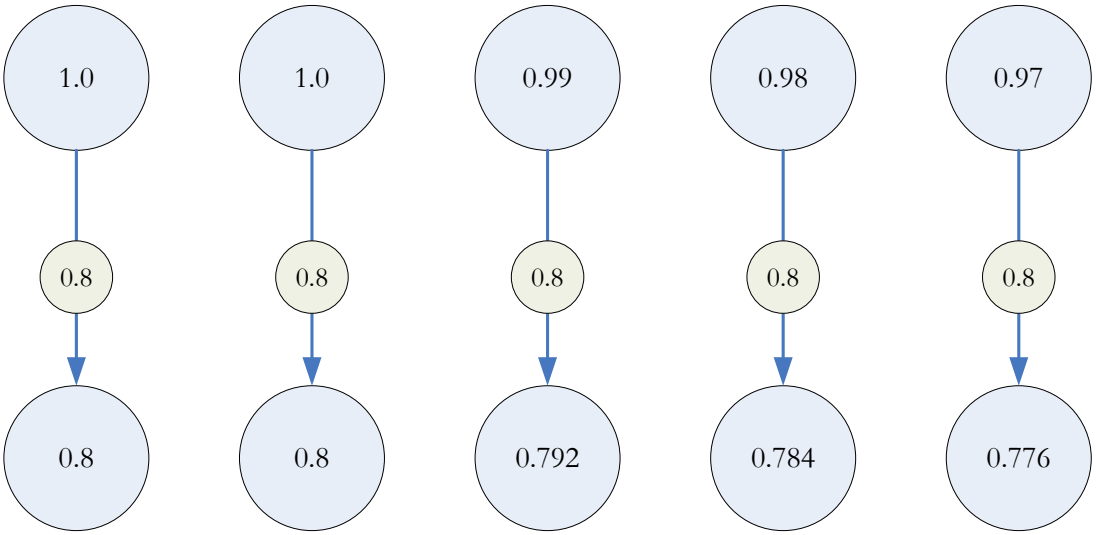

Abb. 7-39 Idealisierte Rezeptorenantwort.

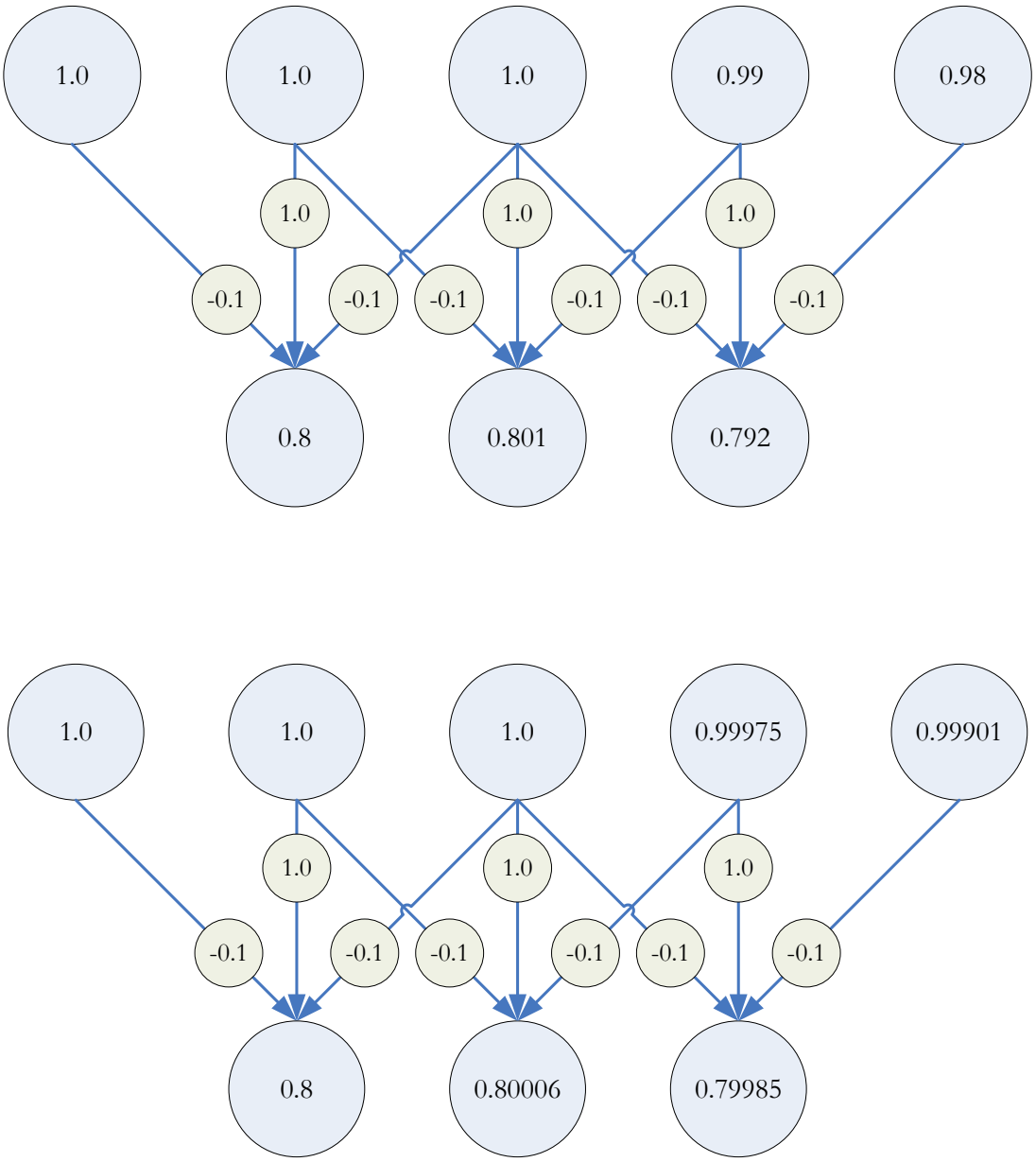

Abb. 7-40 Antwortverhalten von linearer und Sinus-Blendfunktion.

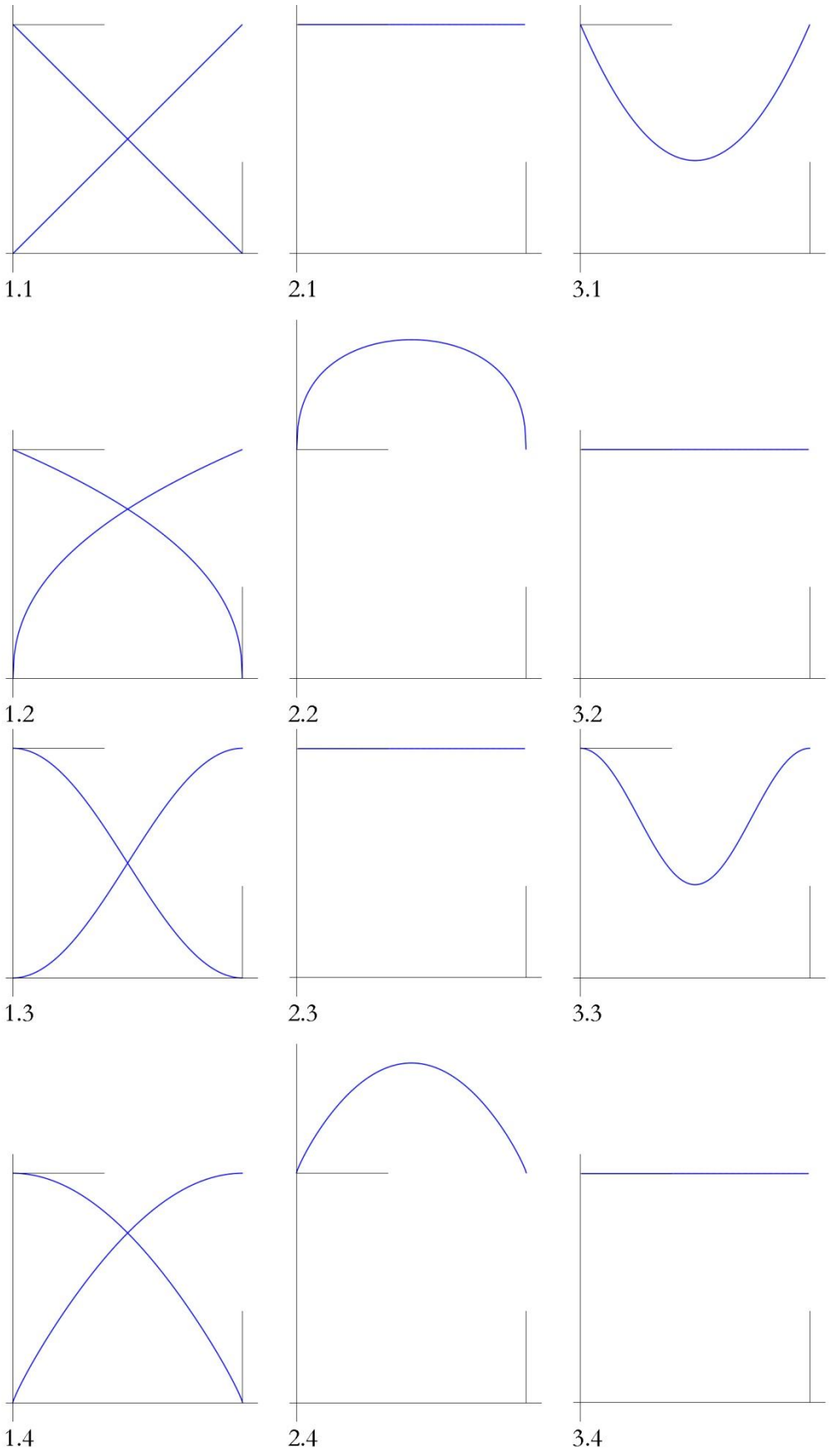

Abb. 7-41 Blendfunktionen (Teilbilder 1.x), Ausgabe idealisierter Projektor (Teilbilder 2.x), Ausgabe realer Projektor (Teilbilder 3.x).

Nachdem nunmehr die Bestimmung der Blendfunktion eingeführt wurde, kann wieder auf die Erzeugung der Blendbilder beim Mosaicking eingegangen werden.

Zuerst erfolgt die Begradigung der Grenzen der Teilprojektionsflächen (unbegradigte Grenzen siehe Abb. 7-42). Dabei kann die Begradigungsgrenze folgendermaßen bestimmt werden:

- parallel zu den Grenzen der Gesamtprojektion ausgerichtete Gerade
- nichtparallele Gerade
- Best-fit-Linienzug.

Für die ersten beiden Punkte muss die Begradigung so erfolgen, dass sich angrenzende Teilprojektionen nur innerhalb des maximalen zentralen Schnittbereichs bzw. nur mit ihren direkten Nachbarn in der Vierer-Nachbarschaft der betrachteten Teilprojektion überlappen. In Abb. 7-43 wird der maximale zentrale Schnittbereich grün dargestellt. Eine Überlappung – außerhalb des zentralen Schnittbereichs – von Teilprojektionsfläche D und Teilprojektionsfläche A, die dem zweiten Teil der Anforderung nicht entspricht, ist in der gleichen Abbildung rot dargestellt.

Bei der Begradigung werden somit überstehende Bereiche entfernt. Dies erfolgt, um die Bestimmung der einzelnen Blendbereiche zu vereinfachen. Sind die bereits erwähnten Bedingungen erfüllt, können die Blendbereiche einer Teilprojektion aus ihrer Vierer-Nachbarschaft bestimmt werden. Somit muss nicht jede Teilprojektion mit sämtlichen angrenzenden Projektionsflächen getestet werden.

Diese Vereinfachung erfolgt aber auch aus ästhetischen Gründen. Da die überstehenden Bereiche nicht über die gesamte Höhe bzw. Breite einer Teilprojektion reichen, können an den Kanten zum ungeblendeten Bereich sichtbare Artefakte entstehen.

Die Begradigung erfolgt anhand der Spalten (vertikal) bzw. Zeilen (horizontal) der Teilprojektionen. Bei einer n × m Projektion werden n-1 bzw. m-1 Begradigungsgrenzen bestimmt. Eine Projektorenzeile bzw. -spalte ergibt einen Teilprojektionsbereich (siehe Abb. 7-44). Die Begradigung muss immer innerhalb dieses Bereiches erfolgen.

Parallele Begradigungsgeraden sorgen für regelmäßige Strukturen der einzelnen Blendbereiche. Sie sind somit gut für Projektionsflächen geeignet, die blickwinkelabhängig (Silverscreen) sind. Eine regelmäßige Struktur wird dann möglicherweise als weniger störend wahrgenommen. Allerdings entsteht bei ungünstiger Aufstellung der Teilprojektoren ein großer Verschnitt. Die Bestimmung der parallelen Grenzen ist trivial. Es muss lediglich eine Gerade gefunden werden, die sich innerhalb des Teilprojektionsbereiches und so dicht wie möglich am ursprünglichen Rand befindet.

Nichtparallele Begradigungsgeraden resultieren in weniger Verschnitt, da sie der Form der Teilprojektionsbereiche eher folgen als ihre parallelen Pendants. Eine Möglichkeit, eine

solche Gerade zu bilden, ist es, den Start- und Endpunkt des aktuell betrachteten Spalten- oder Zeilenrandes zu verbinden. Liegen alle aktuell betrachteten Randpunkte außerhalb dieser Geraden, ist die Begradigungsgerade gefunden. Ist dies nicht der Fall, wird die Gerade so weit verschoben, dass alle betrachteten Randpunkte außerhalb der Begrenzung liegen (siehe Abb. 7-46).

Die beiden soeben beschriebenen Verfahren zur Begradigung sind sehr gut für relativ gerade Projektionsflächen und gut zueinander ausgerichtete Projektoren geeignet. Ist dies – wie z. B. bei dem in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Verfahren – nicht der Fall, sollte ein Best-fit-Verfahren verwendet werden[163]. Hierbei werden lediglich die Spalten[164] aus Abb. 7-44 modifiziert. Dazu wird eine horizontale Scanline über den betrachteten Rand geschoben. Befindet sich lediglich ein Randpixel auf dieser Scanline, ist dieser Wert Teil des modifizierten Randes. Befinden sich mehrere Randpunkte (tritt im Blendbereich auf) auf der Scanline, wird der Wert verwendet, der dichter am Zentrum des aktuell betrachteten Teilprojektionsbereiches liegt. Dabei auftretende Sprünge zwischen Teilsegmenten des Randes werden verbunden. Dies kann eine einfache Gerade oder ein sanfter Übergang zwischen diesen Teilsegmenten sein. In Abb. 7-45 werden die Scanline schwarz, Beispiele für mögliche Randpunkte gelb, die Verbindung zwischen Teilsegmenten rot und die Teilsegmente grün dargestellt. Der final gefundene Best-fit-Rand ist die Kombination aus grünen und roten Teilsegmenten.

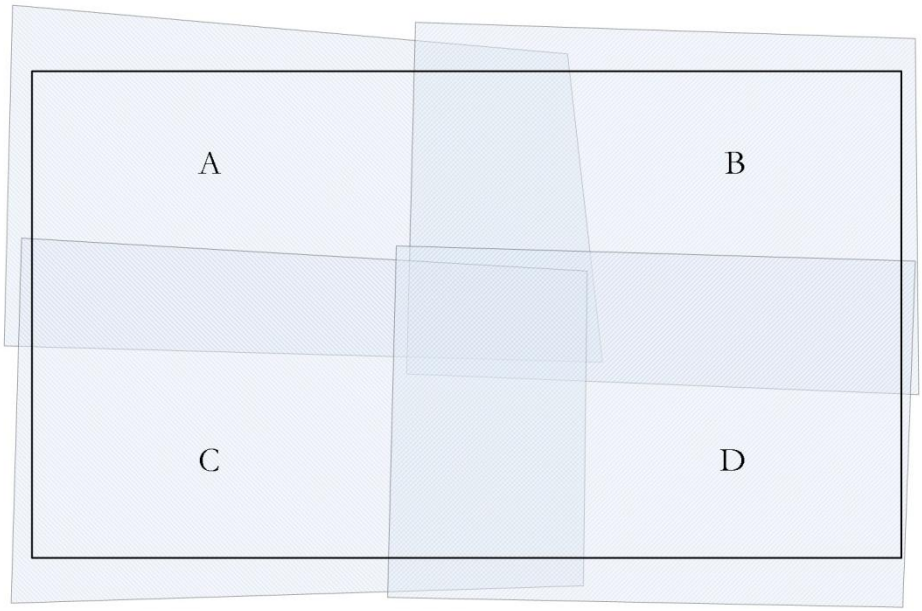

Abb. 7-42 Unbegradigte Überlappungsbereiche.

[163] Beim Best-fit-Verfahren kann auch ganz auf die Begradigung verzichtet werden. Dies kann aber unter Umständen zu störenden Artefakten an den Übergängen zwischen Blendbereich (Graukeil-Seite) und ungeblendetem Bereich führen.

[164] Das Verfahren kann natürlich auch für Zeilen modifiziert werden.

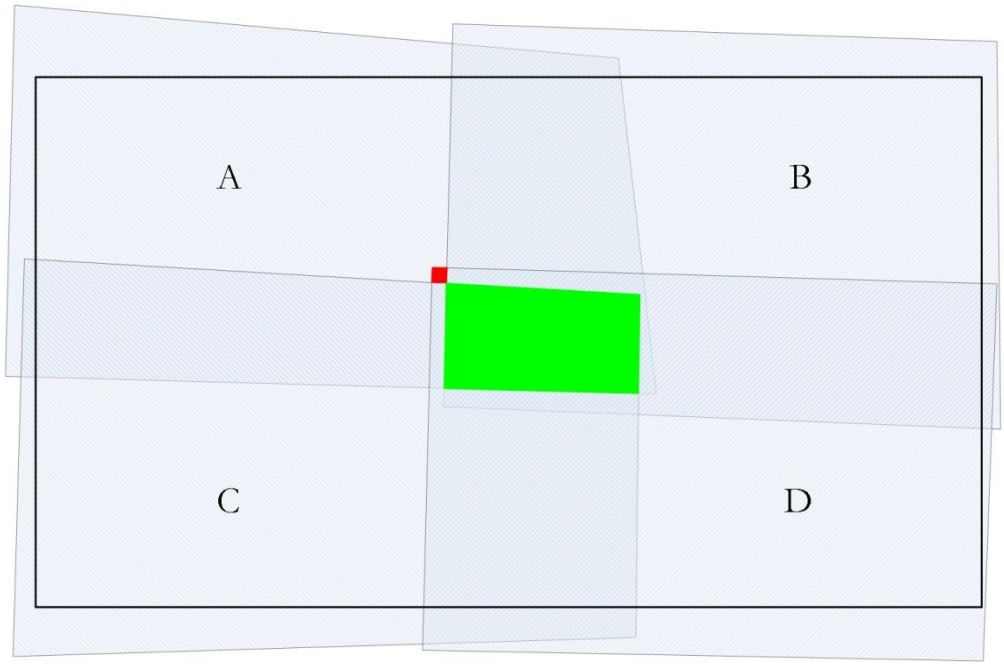

Abb. 7-43 Maximaler gemeinsamer Überlappungsbereich (grün) und überstehender Bereich (rot).

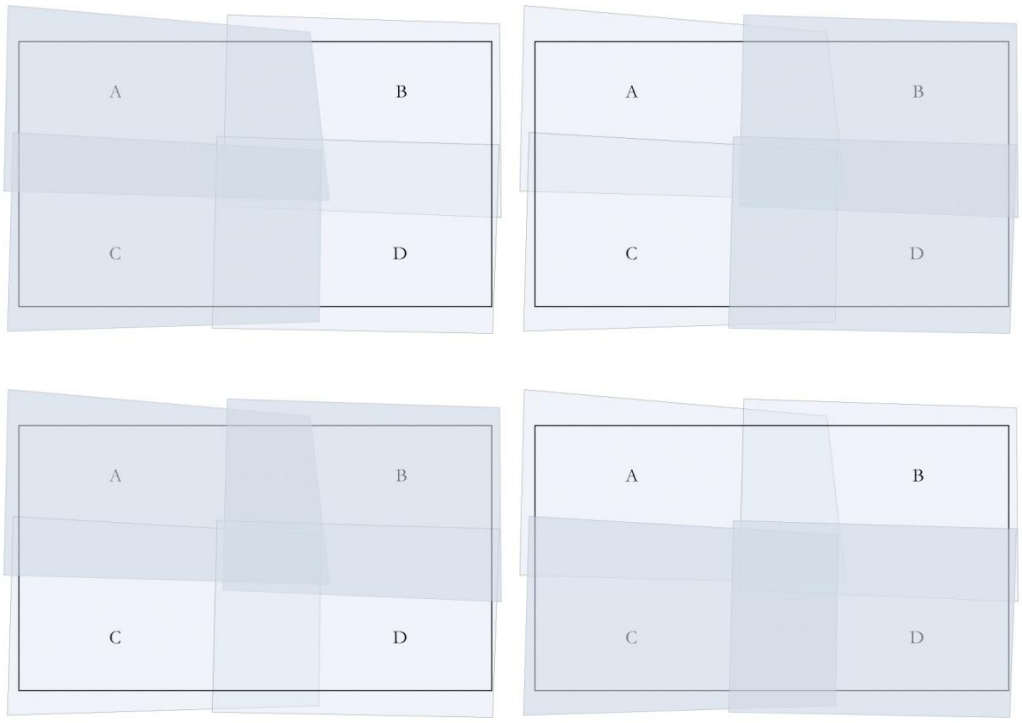

Abb. 7-44 Spalten und Zeilen der zu begradigenden Teilprojektionsbereiche.

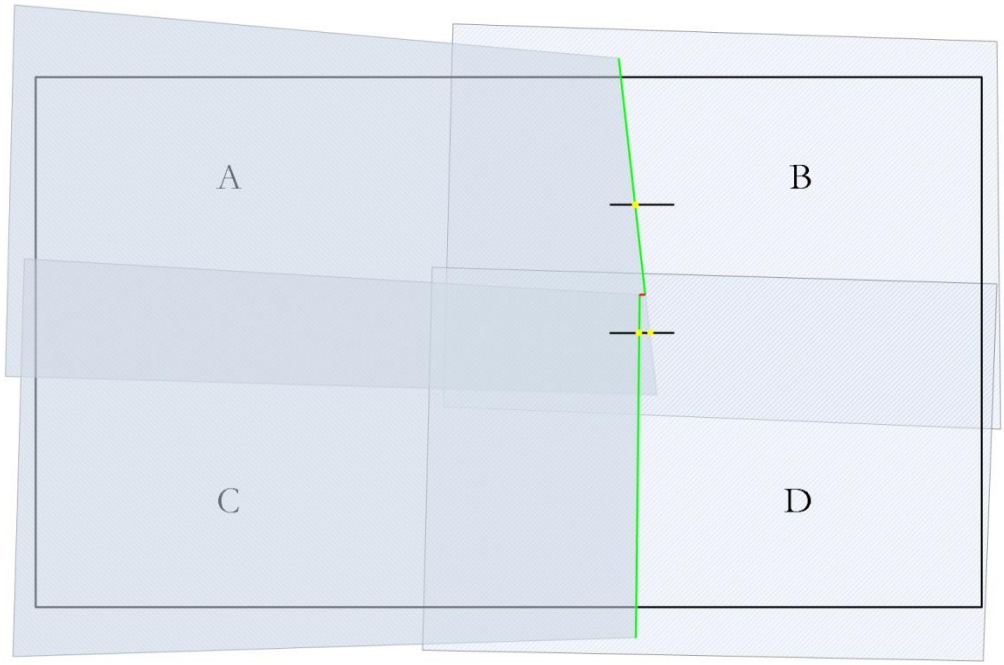

Abb. 7-45 Begradigung eines Teilprojektionsbereiches (Spalte) mittels Scanline (Best-fit-Verfahren).

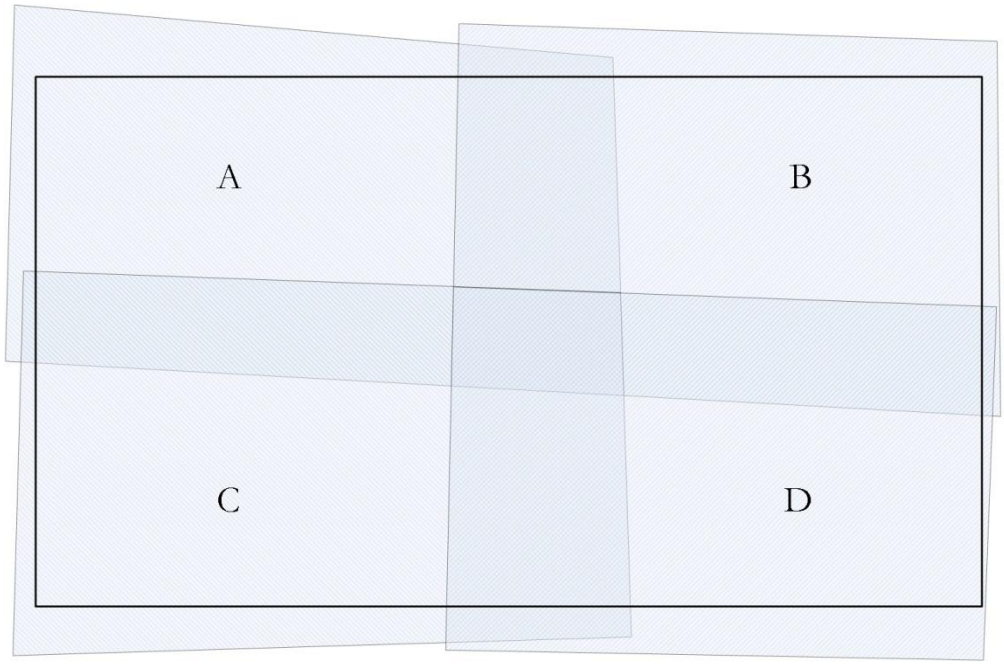

Abb. 7-46 Mit zur größtmöglichen Projektionsfläche nichtparallelen Geraden begradigte Überlappungsbereiche.

Im Anschluss an die Begradigung mittels parallelen oder nichtparallelen Geraden werden für jeden Projektor die direkten *n* Nachbarn (Vierer-Nachbarschaft) bestimmt (siehe Abb. 7-47) und *n* uv-Bilder erzeugt[165].

Die betrachtete Teilprojektion – repräsentiert durch ihren Rand – wird paarweise mit ihren Nachbarn der Vierer-Nachbarschaft geschnitten. Somit werden *n* Blendbereiche gefunden, die jeweils in einem der *n* uv-Bilder markiert werden (siehe Abb. 7-48). Anfang und Ende – und somit die Richtung – der einzelnen Blendbereiche können aus den Positionen der Teilprojektionen entnommen werden. Somit kann eine Wahl getroffen werden, ob *f(x)* oder *g(x)* zu benutzen ist (siehe Formel 7-50).

Beim Best-fit-Verfahren werden für jede Teilprojektion auch *n* uv-Bilder erzeugt; dabei ist n die Summe der direkten Nachbarn in der Spalte, zu der diese Teilprojektion gehört, und der Anzahl der direkt angrenzenden Spalten.

Die betrachtete Teilprojektion wird paarweise mit den direkten vertikalen Nachbarn (in der betrachteten Spalte) und den gesamten direkt angrenzenden Spalten geschnitten. Die so gefundenen *n* Blendbereiche werden wiederum in einem der uv-Bilder markiert. Die Wahl von *f(x)* bzw. *g(x)* erfolgt analog zu den Geraden-Verfahren.

Aufgrund der bekannten Richtung der Blendfunktion *f(x)* bzw. *g(x)* kann der Rand initial mit Argumenten v_i für die Funktion gefüllt werden. Die Startzeile oder -spalte wird mit 0.0, die Endzeile oder -spalte mit 1.0 initialisiert. Die fehlenden Randwerte werden linear in Abhängigkeit von ihrer Position auf der betrachteten Zeile oder Spalte bestimmt. Dies wird in Abb. 7-49 für einen horizontalen Blendbereich, der von oben nach unten verläuft, verdeutlicht.

Für jeden Pixel muss nun innerhalb des Blendbereiches das Argument für die Blendfunktion bestimmt werden. Dafür werden die euklidischen Abstände d_i des betrachteten Pixels *P* zu allen initialisierten Randpixeln R_i bestimmt (siehe Abb. 7-50).

Anschließend wird die Wichtung w_i jedes einzelnen Randpixels bestimmt.

$$w_i = \frac{\frac{1}{d_i}}{\sum \frac{1}{d}}$$

Formel 7-51 Wichtung eines Randpixels.

Nun kann das Argument v_{Pi} der Blendfunktion für den betrachteten Pixel in Abhängigkeit von der Wichtung w_i und den Argumenten v_i bestimmt werden.

$$v_{Pi} = \sum w_i \cdot v_i$$

Formel 7-52 Argument der Blendfunktion.

[165] Die Erzeugung von *n* uv-Bildern ist nicht unbedingt notwendig, dient aber der besseren Verständlichkeit.

Diese Argumente werden für jeden Pixel im Blendbereich bestimmt. Anschließend werden diese Werte in die Blendfunktion eingesetzt. Der bestimmte Wert wird an entsprechender Position in das aktuell betrachtete uv-Bild eingetragen[166].

Die beschriebene Vorgehensweise wird für die anderen *n-1* uv-Bilder wiederholt. Im Anschluss werden diese uv-Bilder, die jeweils die Blendwerte für eine Richtung enthalten, miteinander multipliziert. Somit werden in diesem uv-Bild die Überblendungen aller überlappenden Bereiche betrachtet (siehe Abb. 7-51).

Bereiche innerhalb des uv-Bildes und außerhalb der aktuell betrachteten begradigten Teilprojektion müssen schwarz gefärbt werden (siehe Abb. 7-52). Dies ist notwendig, da die Blendbilder anhand der begradigten Teilprojektionsflächen bestimmt wurden und im anschließenden Schritt in den Projektorraum transformiert werden. Würde keine Schwärzung im uv-Bild erfolgen, wären einige Bereiche außerhalb der Begradigung im transformierten Bild immer noch weiß. Somit wären möglicherweise im Framebuffer undefinierte Farbwerte sichtbar. Erfolgt die Schwärzung, werden diese Bildbereiche bei der Projektion ausgeblendet.

Das so bestimmte finale uv-Bild einer Teilprojektion wird wiederum mittels Image-Warping in den Projektorraum transformiert (siehe Abb. 7-53 und Kapitel 7.1.64.1.1.8).

Die Bestimmung der Blendbilder für die restlichen Teilprojektionen erfolgt analog zur beschriebenen Vorgehensweise. Werden alle bereits kalibrierten Bildinhalte der Teilprojektionen mit ihren jeweiligen Blendbildern moduliert, ergibt sich eine von der Helligkeit her homogene Gesamtprojektion.

[166] Erfolgt die Begradigung der Teilprojektionsflächen mit parallelen bzw. nichtparallelen Geraden, kann der Blendbereich auch einfacher per uv-Look-up bestimmt werden. Dies ist möglich, da in diesem Fall sowohl ein viereckiger Quell- als auch ein viereckiger Zielbereich vorliegen (siehe auch nächstes Kapitel). Der Quellbereich – eine rechteckige Abbildung der Blendfunktion – wird in den Zielbereich gewarpt.

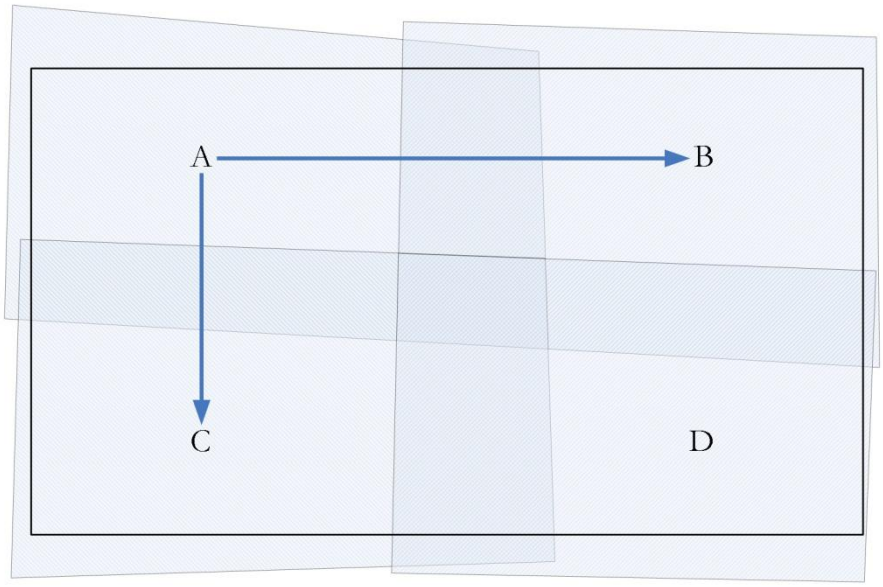

Abb. 7-47 Direkte Nachbarn in der Vierer-Nachbarschaft einer begradigten Teilprojektion.

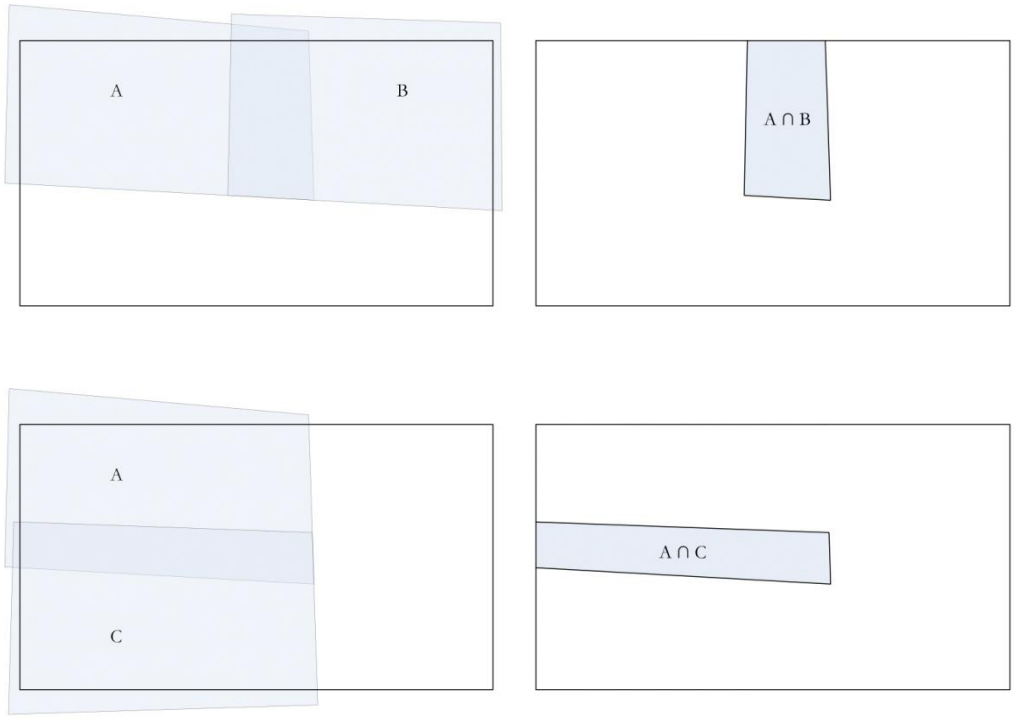

Abb. 7-48 Blendbereiche einer begradigten Teilprojektion.

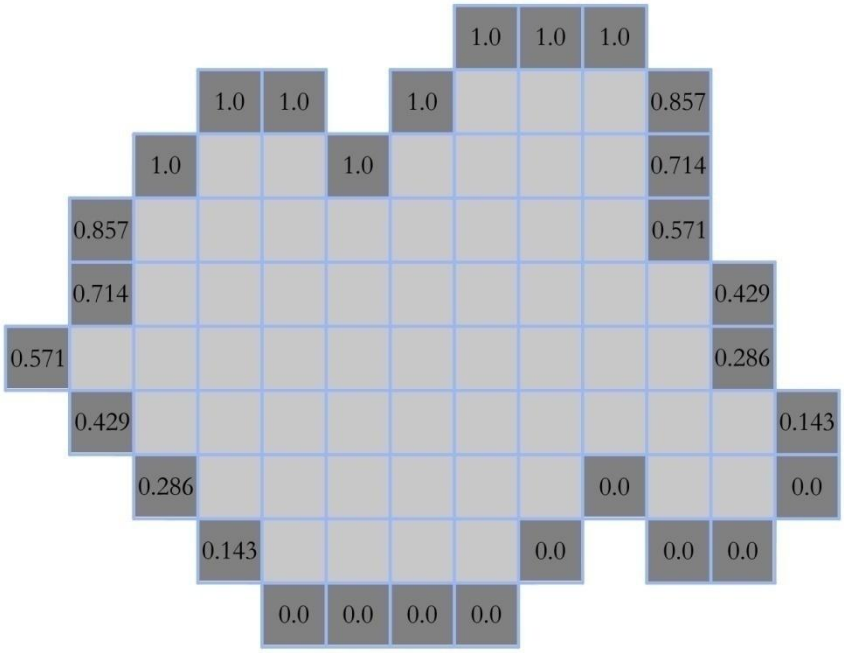

Abb. 7-49 Initialisierung der Argumente der Blendfunktion.

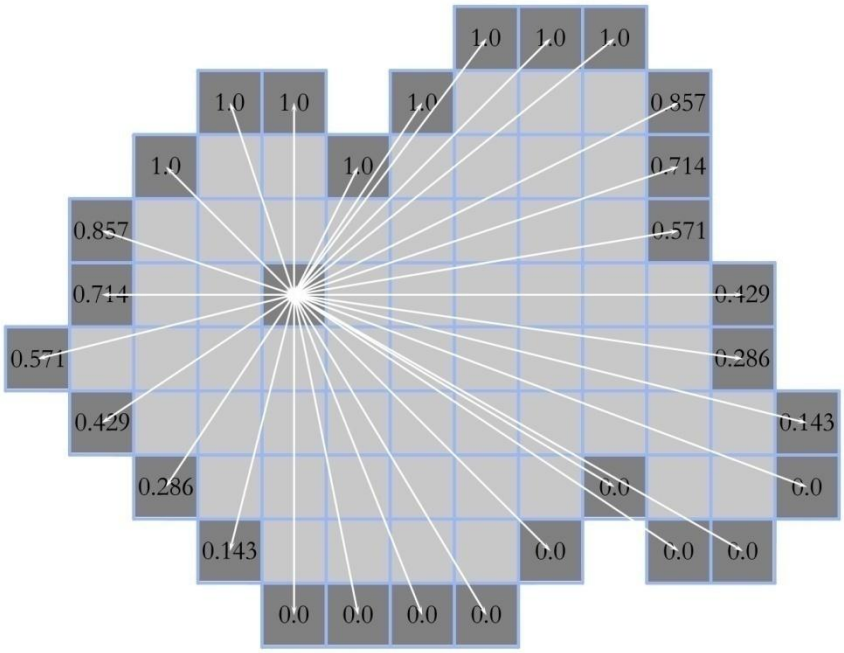

Abb. 7-50 Abstände eines Pixels im Blendbereich zum initialisierten Rand.

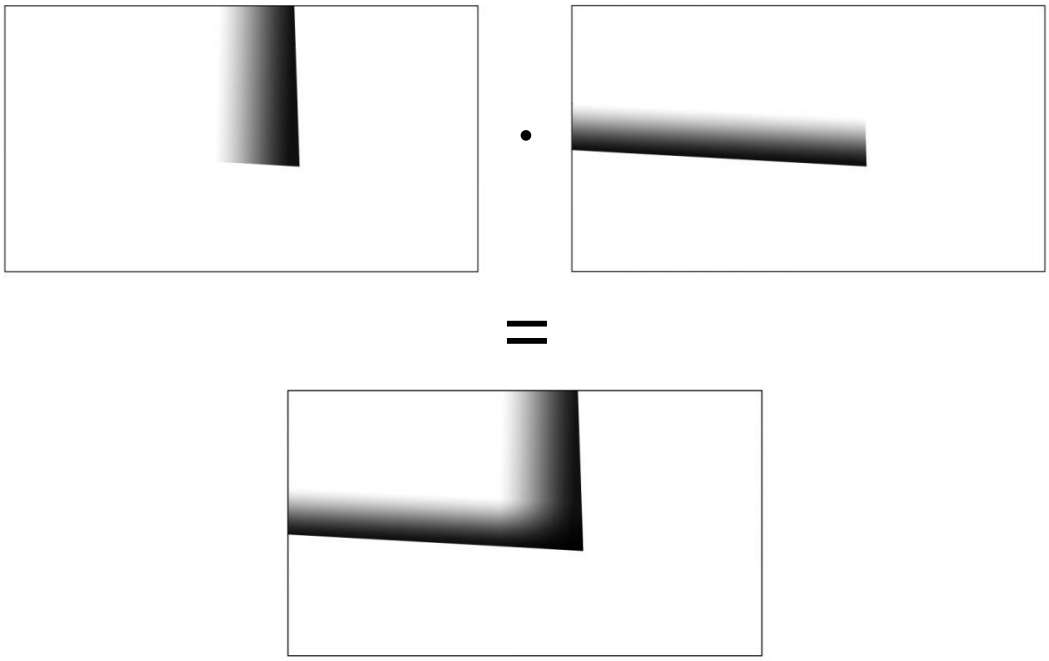

Abb. 7-51 Mehrkanalblending.

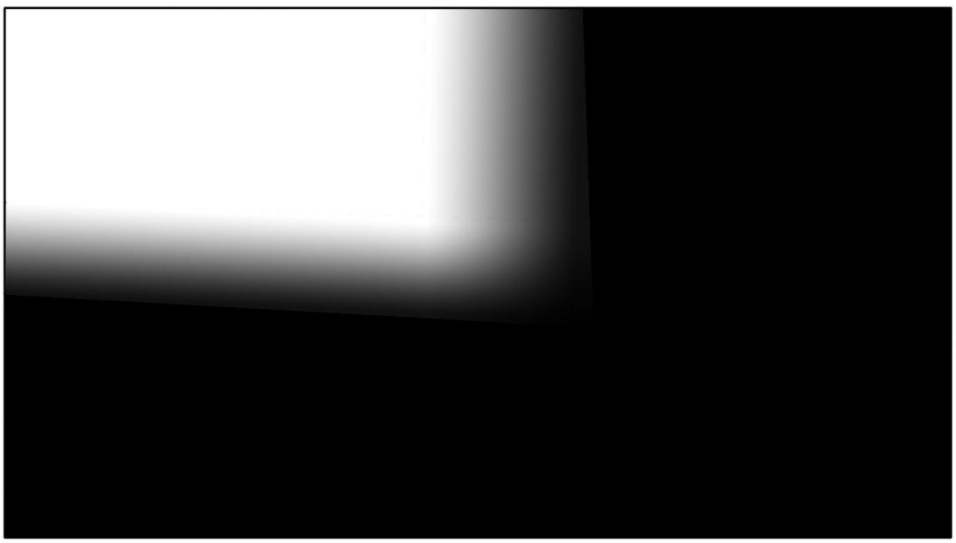

Abb. 7-52 Finales uv-Bild einer Teilprojektion.

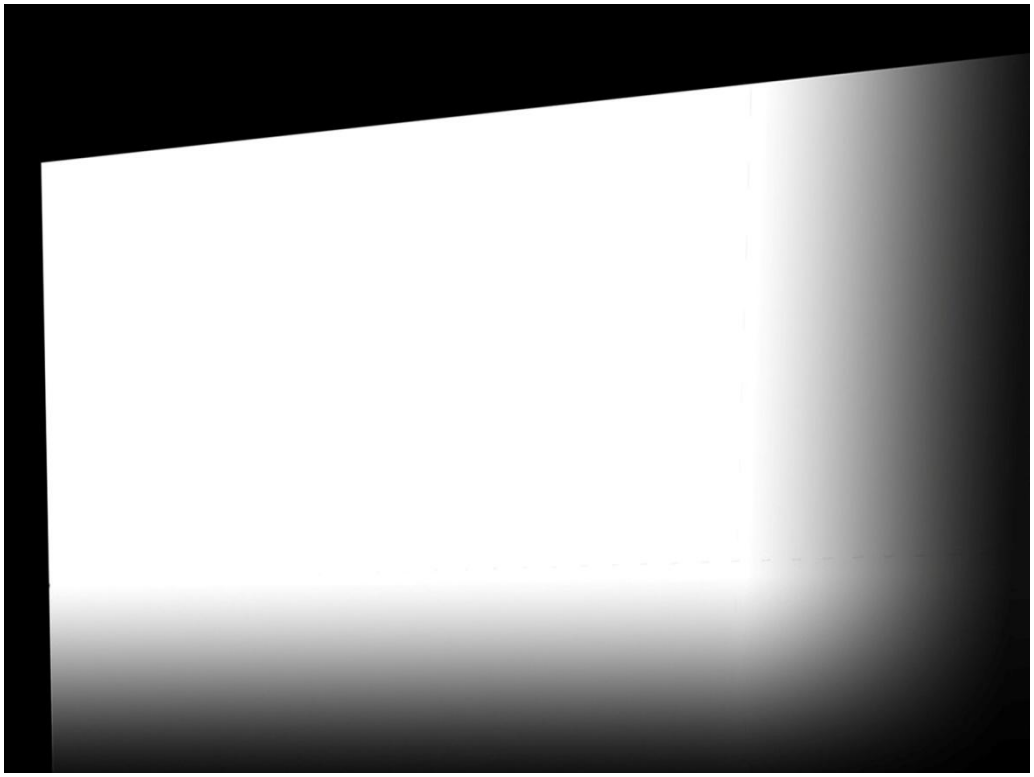

Abb. 7-53 Finales Blendbild einer Teilprojektion.

7.1.6 Echtzeitanwendung

Der finale Schritt des Algorithmus ist die Echtzeitanwendung der zuvor berechneten Warping-Parameter. Wie bereits erwähnt, wird das Gesamtbild von einem oder mehreren Projektoren dargestellt. Dieses Gesamtbild liegt dabei in Form einer uv-Textur vor. Um eine homogene Gesamtprojektion zu erreichen, muss jede Teilprojektion einen Teil aus dieser uv-Textur darstellen (uv-Texture-Look-up). Überlappende Teilprojektions-Bereiche stellen dieselben Inhalte dar. Um eine homogene Gesamthelligkeit dieser Bereiche zu erreichen, werden die Teilprojektionen mit ihrem Blendbild multipliziert. Diese Schritte sind die letzten beiden Schritte vor der Ausgabe der Bilder und sollten bei bewegten Bildinhalten echtzeitfähig sein. Sie können in der Rendering Loop einer Applikation, im Grafikkarten-Treiber oder auch in den Projektoren umgesetzt werden. Das Ergebnis dieser Schritte ist eine kalibrierte Gesamtprojektion. Alle Teilprojektionen sind zueinander und in Bezug auf die größtmögliche Projektionsfläche *Rect* ausgerichtet. Die Helligkeit in den Überlappungsbereichen ist korrigiert.

Die Korrektur der Ausrichtung der einzelnen Projektoren erfolgt mittels Image-Warping. Beim Image-Warping wird ein Quellbild in ein Zielbild übertragen und dabei in seiner Form verzerrt. Beim hier beschriebenen Verfahren erfolgt das Image-Warping mittels uv-Texture-Look-up, bei dem die entsprechenden Bildbereiche aus der uv-Textur des Gesamtbildes herausgenommen werden. Für einen solchen Texture-Look-up muss sowohl ein Quellbe-

reich (Woher kommt der Bildbereich?) als auch ein Zielbereich (Wohin kommt der Bildbereich?) definiert sein. Der Quellbereich wird somit in den Zielbereich transformiert[167] (Tönnies 1994).

Beim hier zur Anwendung kommenden Verfahren erfolgt kein globales Image-Warping. Der Gesamtwarp – und somit die Gesamtkorrektur – wird mit Hilfe vieler kleiner Teilwarps erzeugt. Für jeden Teilwarp müssen somit die Koordinaten des Quell- und Zielbereiches bestimmt werden. Da im ersten Schritt des Algorithmus (siehe Kapitel 7.1.1) Kalibrierstreifen mit einem regelmäßigen Abstand *distance* projiziert wurden, ist bekannt, wo die Schnittpunkte dieser Streifen im Projektorraum liegen. Somit kann der Zielbereich *Z(i, j)* für einen derartigen Teilwarp leicht bestimmt werden (siehe Formel 7-53 und Abb. 7-54).

$$Z(i,j).P_0 = (x_0, y_0) = (i \cdot distance, j \cdot distance)$$
$$Z(i,j).P_1 = (x_1, y_1) = (i \cdot distance, (j+1) \cdot distance)$$
$$Z(i,j).P_2 = (x_2, y_2) = \big((i+1) \cdot distance, (j+1) \cdot distance\big)$$
$$Z(i,j).P_3 = (x_3, y_3) = ((i+1) \cdot distance, j \cdot distance)$$

Formel 7-53 Eckpunkte des Zielbereichs eines Teilwarps.

Bei *n* vertikalen und *m* horizontalen Kalibrierstreifen entstehen *n-1* × *m-1* Zielbereiche.

Die mit diesem Zielbereich korrespondierenden uv-Koordinaten des Quellbereiches wurden bereits bei der Bestimmung der Warping Parameter berechnet (siehe Kapitel 7.1.5.1) und lassen sich aus M_{uv} abrufen.

Wurden alle *n-1* × *m-1* Teilwarps durchgeführt, ist das Bild der betrachteten Teilprojektion bezüglich der größtmöglichen Gesamtprojektionsfläche *Rect* korrigiert (siehe Abb. 1-3). Dies wird beispielhaft für zwei Teilwarps in Abb. 7-55 verdeutlicht. Das Verfahren wird analog für sämtliche Teilprojektionen durchgeführt. Zur Verbesserung der Bildqualität und zur Unterdrückung von Alias-Artefakten sollte beim Texture-Look-up eine Textur-Filterung eingesetzt werden. Es kann sich dabei beispielsweise um eine bilineare, bikubische oder anisotrope Filterung handeln.

[167] Dieser Texture-Look-up ist effizient in Grafik-Hardware umgesetzt. Auf ihn kann über APIs, wie DirectX oder OpenGL, zugegriffen werden.

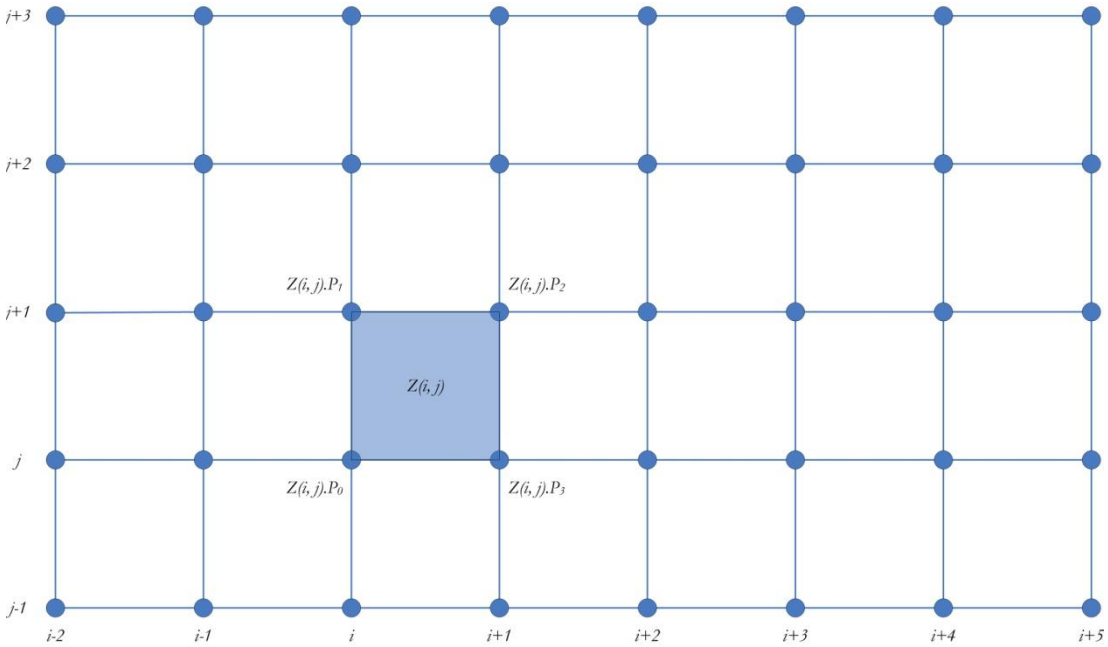

Abb. 7-54 Zielbereich eines Teilwarps.

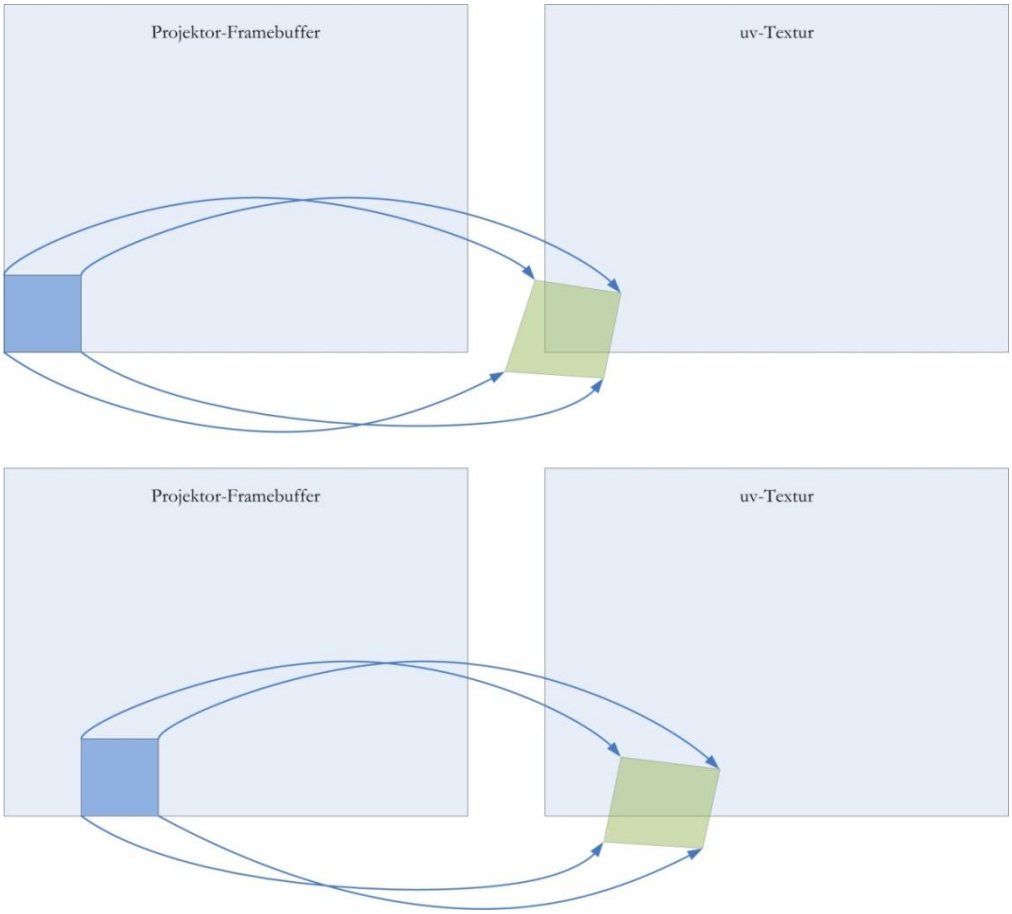

Abb. 7-55 Teilwarp mittels Texture Lookup: Transformation von Bildinhalten aus dem Texturraum in den Projektorraum.

Nach dem erfolgten Image-Warping weisen überlappende Bildbereiche eine zu große Helligkeit auf. Die Teilprojektionen müssen somit mit den zuvor bestimmten Blendbildern multipliziert werden. Liegen drei Blendbilder für Rot-, Grün- und Blau-Kanal vor, wird der jeweilige Farbkanal mit dem entsprechenden Blendbild multipliziert.

Die Multiplikation mit dem Blendbild bzw. mehreren Blendbildern erfolgt wiederum für sämtliche Teilprojektionen. Die resultierende Gesamtprojektionsfläche weist nun auch eine homogene Helligkeit auf (siehe Abb. 4-3 und Abb. 1-4).

7.2 AutoCalib2D – Projektionsflächenbezogene 2D-Kalibrierung

7.2.1 Projektion und Aufnahme der Kalibrierbilder

Die bei diesem Verfahren zu projizierenden Kalibrierbilder, sind in Abb. 7-56 bis Abb. 7-65 dargestellt.

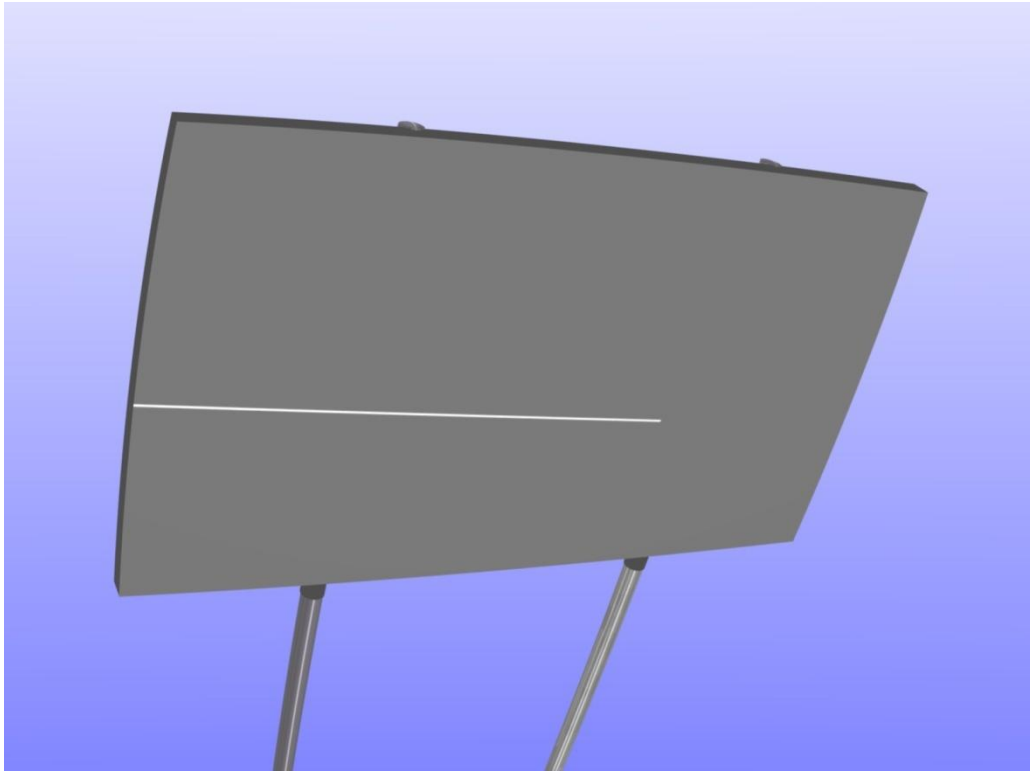

Abb. 7-56 Projektor 1, horizontaler Referenzstreifen.

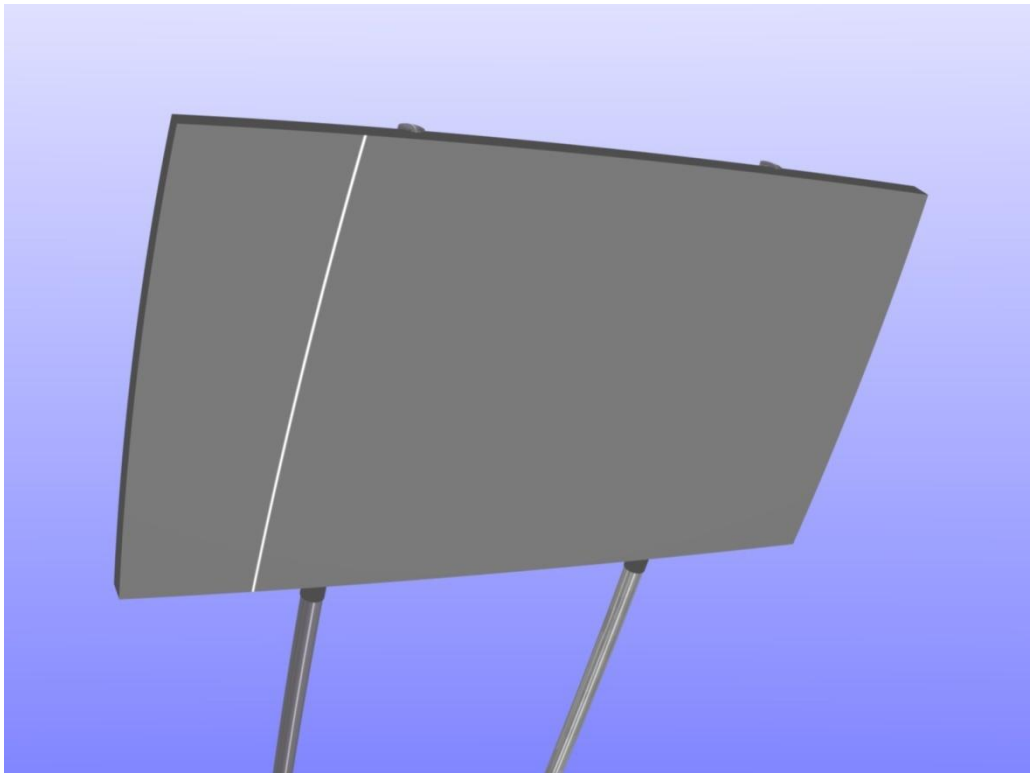

Abb. 7-57 Projektor 1, vertikaler Referenzstreifen.

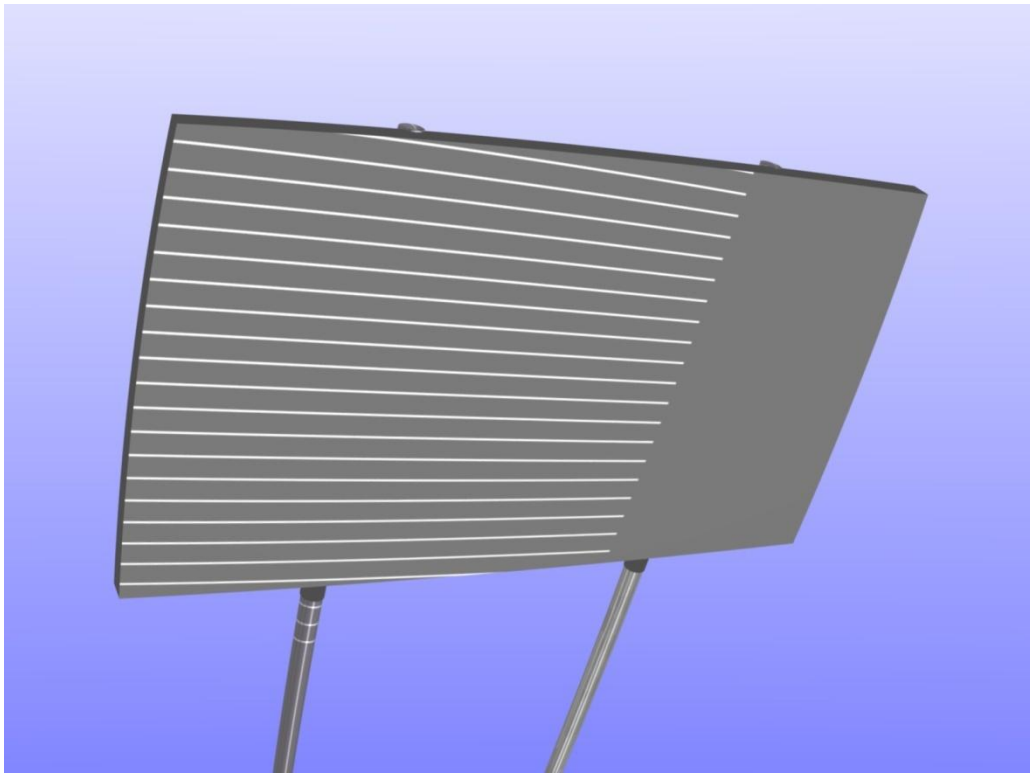

Abb. 7-58 Projektor 1, horizontale Kalibrierstreifen.

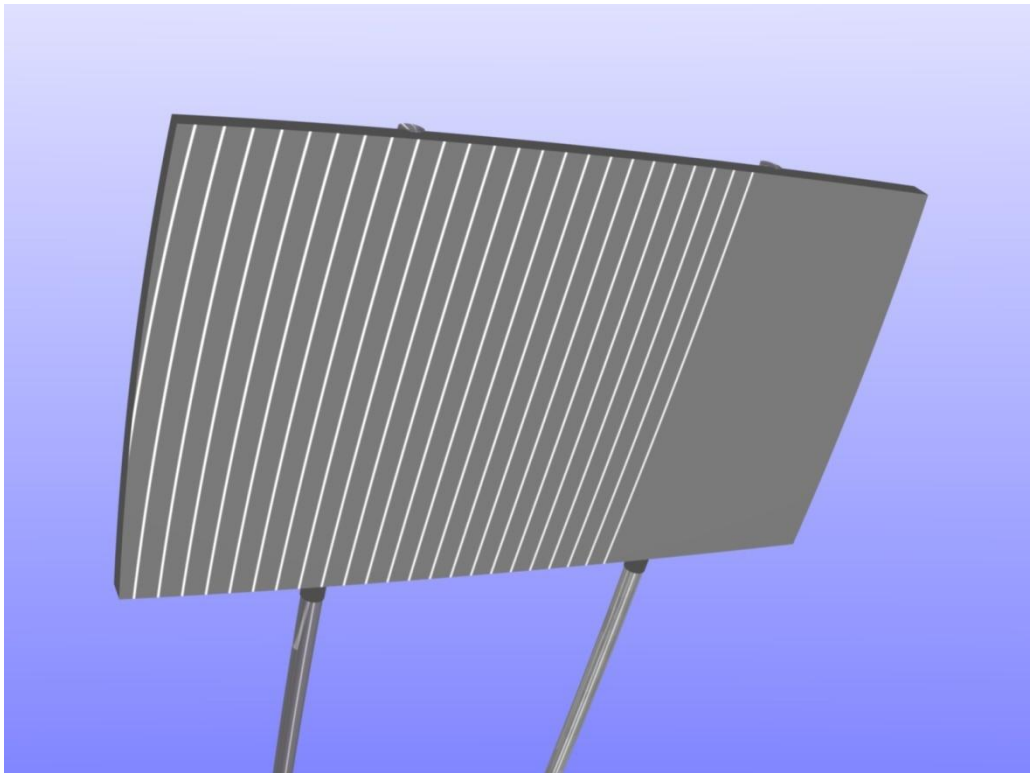

Abb. 7-59 Projektor 1, vertikale Kalibrierstreifen.

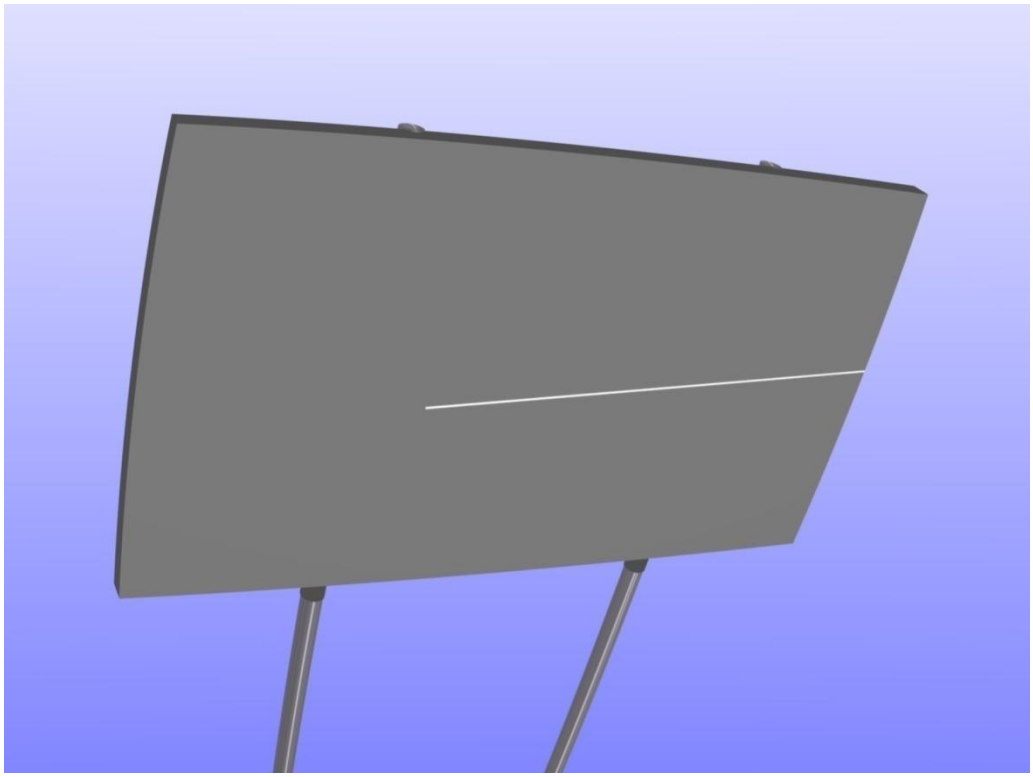

Abb. 7-60 Projektor 2, horizontaler Referenzstreifen.

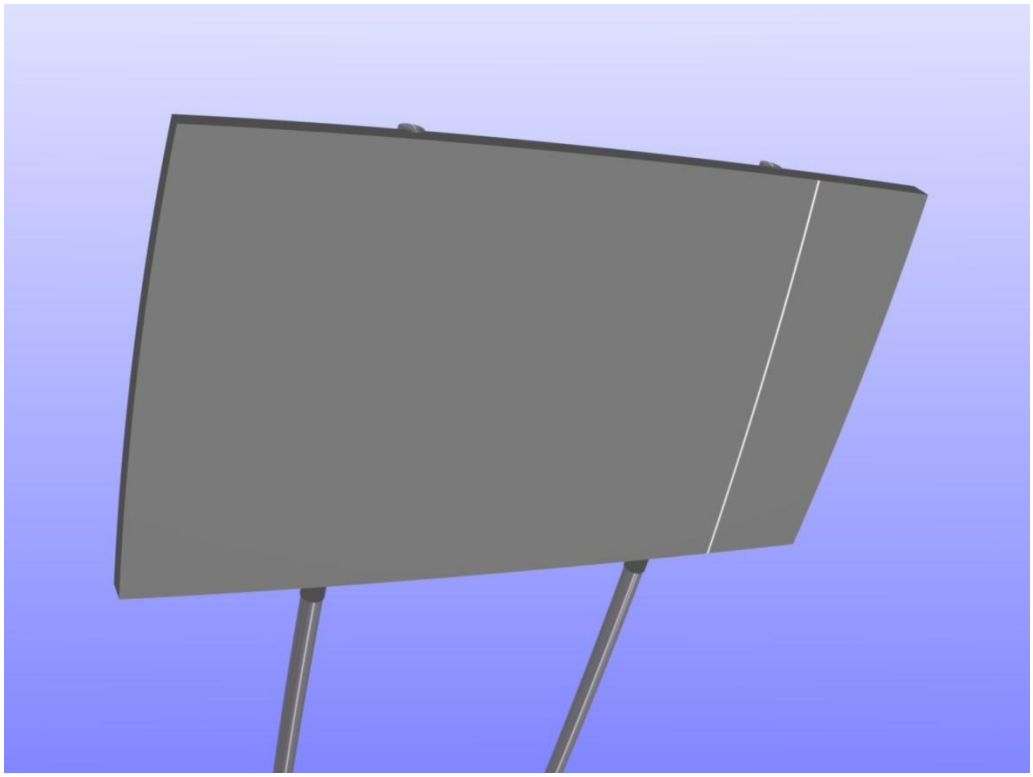

Abb. 7-61 Projektor 2, vertikaler Referenzstreifen.

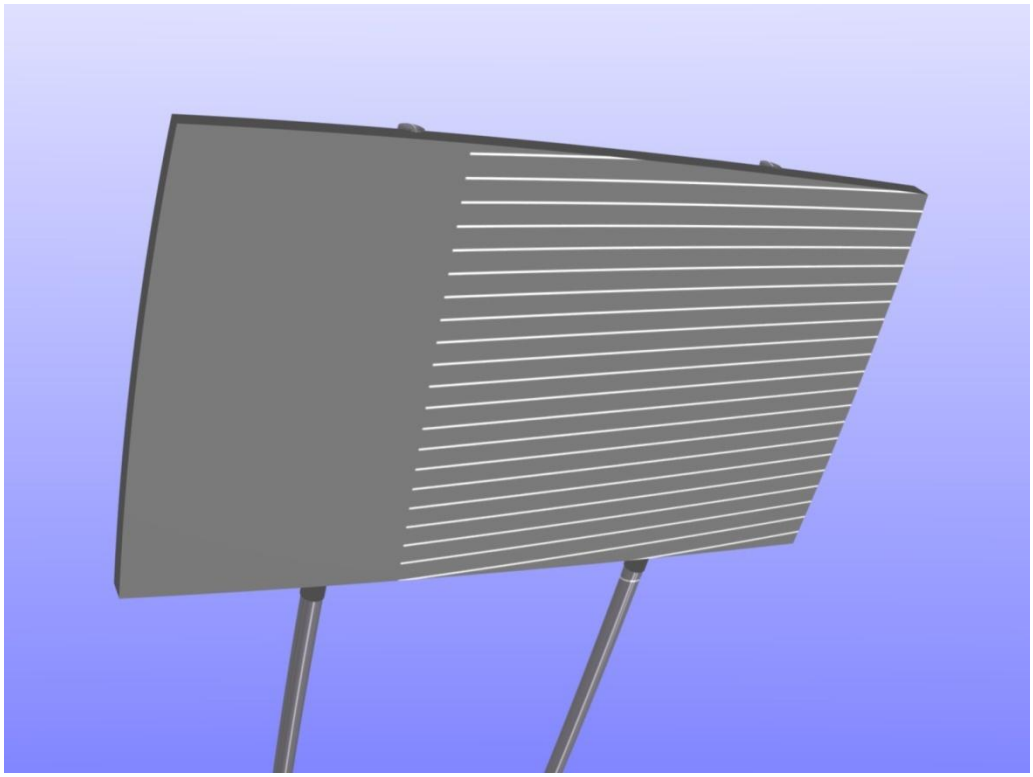

Abb. 7-62 Projektor 2, horizontale Kalibrierstreifen.

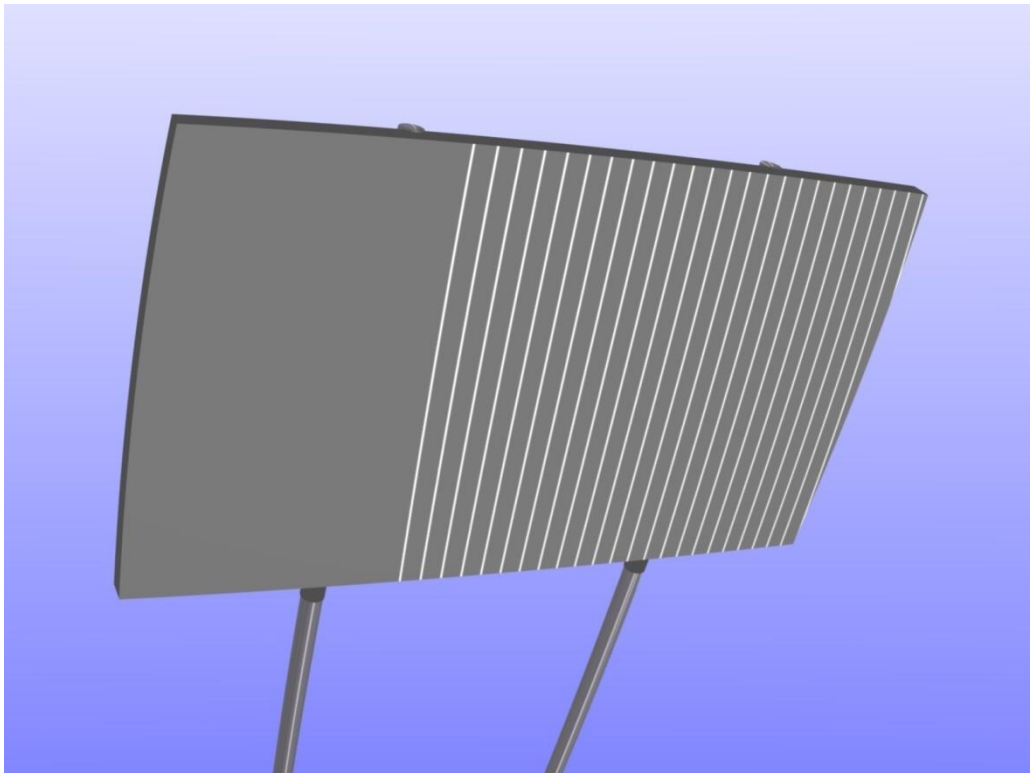

Abb. 7-63 Projektor 2, vertikale Kalibrierstreifen.

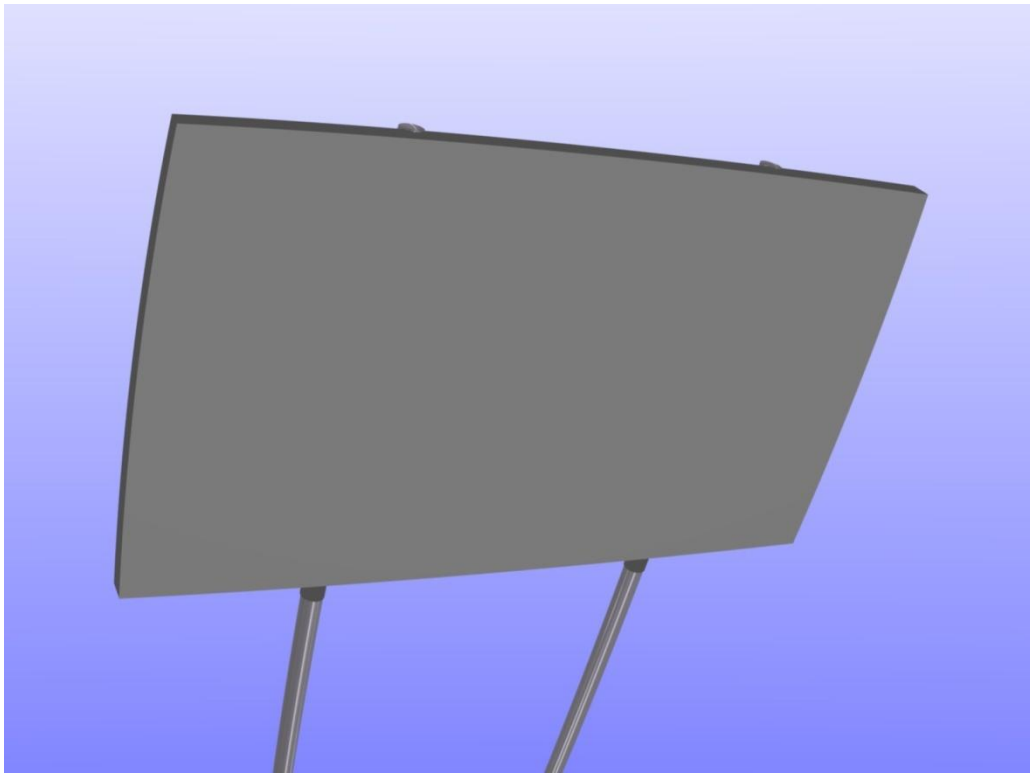

Abb. 7-64 Schwarzbild.

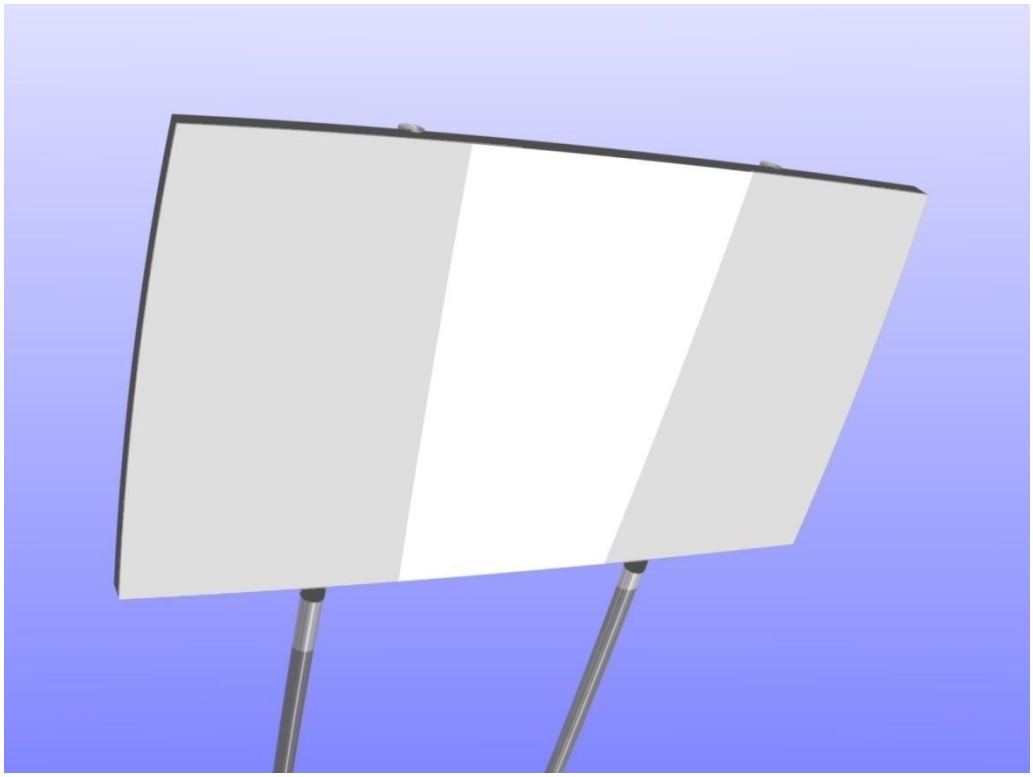

Abb. 7-65 Weißbild.

7.2.2 Schnittpunktbestimmung der Kalibrierbilder

Die Schnittpunktbestimmung der gefilterten Kalibrierstreifen erfolgt analog zu dem in den Kapiteln 4.1.1.5 und 7.1.3 beschriebenen Algorithmus unter Verwendung der gefilterten Kalibrierstreifen und der Parameter zur Linsenentzerrung. Zusätzlich zu den gefundenen Schnittpunkten (siehe Abb. 7-66) müssen noch weitere Schnittpunkte rekonstruiert werden. Dies ist notwendig, da anhand der gefundenen Schnittpunkte nicht sämtliche für das vollständige Ausfüllen der Projektionsfläche benötigten Zielbereiche für den uv-Texture-Look-up bestimmt werden können (rote Bereiche in Abb. 7-67). Die zur Bestimmung dieser Zielbereiche notwendigen Schnittpunkte werden mit Hilfe eines simplen Extrapolationsverfahrens bestimmt (siehe Abb. 7-68).

Dabei werden für jede Zeile bzw. Spalte von Schnittpunkten[168] (schwarz in der Abbildung) so lange neue Schnittpunkte extrapoliert, bis sich diese außerhalb der Projektionsfläche befinden (rot in der Abbildung). Des Weiteren müssen auch die Eckbereiche der durch die Extrapolation entstehenden neuen Zeilen bzw. Spalten ermittelt werden (grün in der Abbildung).

[168] In einer Schnittpunktzeile befinden sich alle Schnittpunkte, die auf dem gleichen horizontalen Kalibrierstreifen liegen. In einer Schnittpunktspalte befinden sich alle Schnittpunkte, die auf dem gleichen vertikalen Kalibrierstreifen liegen.

Zur Bestimmung der zu extrapolierenden Schnittpunkte werden die Abstände zwischen den vorhandenen benachbarten Schnittpunkten auf einer Zeile bzw. Spalte betrachtet. Aus benachbarten Abständen auf einer Zeile bzw. Spalte wird ein Skalierungsfaktor bestimmt. Mehrere dieser Zeilen- bzw. Spaltenskalierungsfaktoren können zur Fehlerminimierung gemittelt werden. Zur Bestimmung eines neuen Schnittpunktes wird der Vektor, der vom Vorgänger zum letzten vorhandenen Schnittpunkt auf dieser Zeile bzw. Spalte führt, mit dem Skalierungsfaktor multipliziert und zu diesem Schnittpunkt addiert. Das Ergebnis ist der neue extrapolierte Schnittpunkt.

Es seien S_n der zu extrapolierende Schnittpunkt und S_{n-1} und S_{n-2} die nächsten existierenden Schnittpunkte auf der Zeile bzw. Spalte, dann erfolgt die Bestimmung von S_n wie folgt.

$$S_n = S_{n-1} + \vec{v}_{n-1} \cdot s$$

mit

$$s = \frac{\|\vec{v}_{n-1}\|}{\|\vec{v}_{n-2}\|}$$

$$\vec{v}_{n-1} = S_{n-1} - S_{n-2}$$

$$\vec{v}_{n-2} = S_{n-2} - S_{n-3}$$

Formel 7-54 Lineare Extrapolation von Schnittpunkten.

Das Ergebnis der Schnittpunkt-Extrapolation sind sämtliche für die weitere Kalibrierung notwendigen und bereits von der Linsenverzerrung korrigierten Schnittpunkte der Kalibrierstreifen. Diese Schnittpunkte liegen für jede an der Projektion beteiligte Teilprojektion vor. „Normale“ und extrapolierte Schnittpunkte werden in Arrays gespeichert.

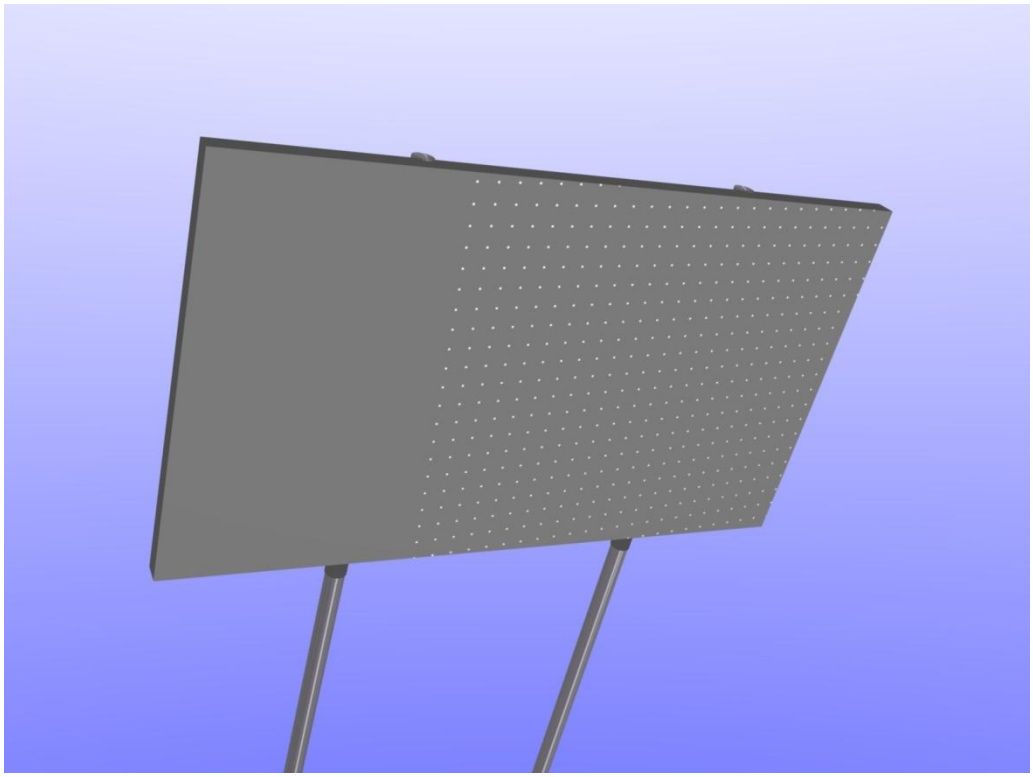

Abb. 7-66 Schnittpunkte einer Teilprojektion.

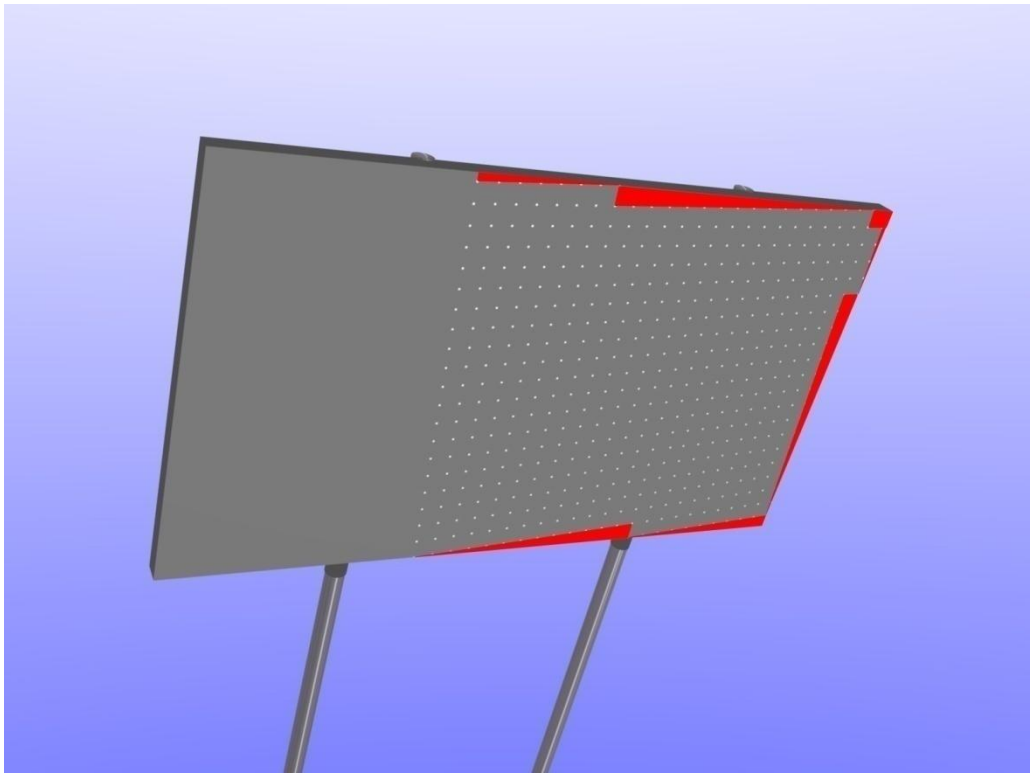

Abb. 7-67 Anhand der vorhandenen Schnittpunkte unbestimmte Zielbereiche des uv-Texture-Look-ups.

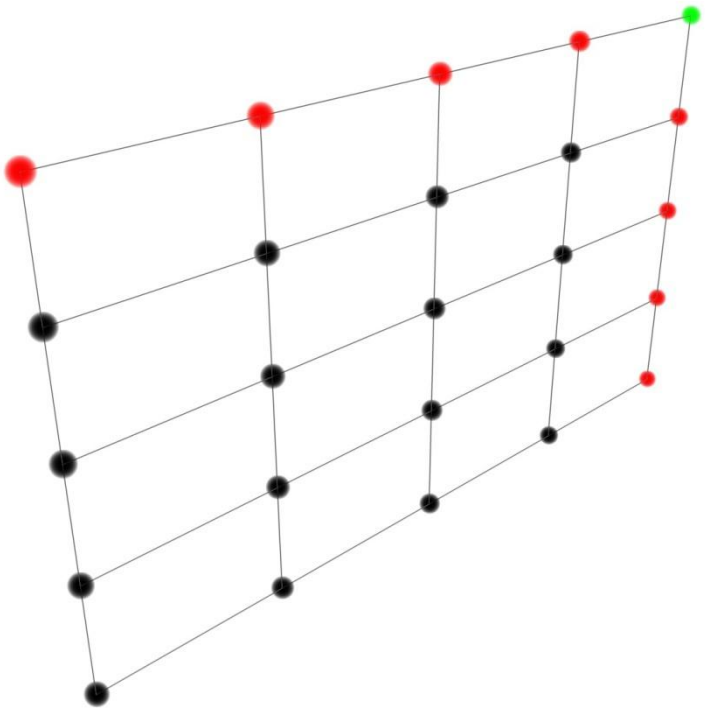

Abb. 7-68 Extrapolation von Schnittpunkten.

7.3 AutoCalib3D – Projektionsflächenbezogene 3D-Kalibrierung

7.3.1 Projektion und Aufnahme der Kalibrierbilder

Die für diesen Algorithmus benötigten Kalibrierbilder sind in Abb. 7-69 bis Abb. 7-78 dargestellt.

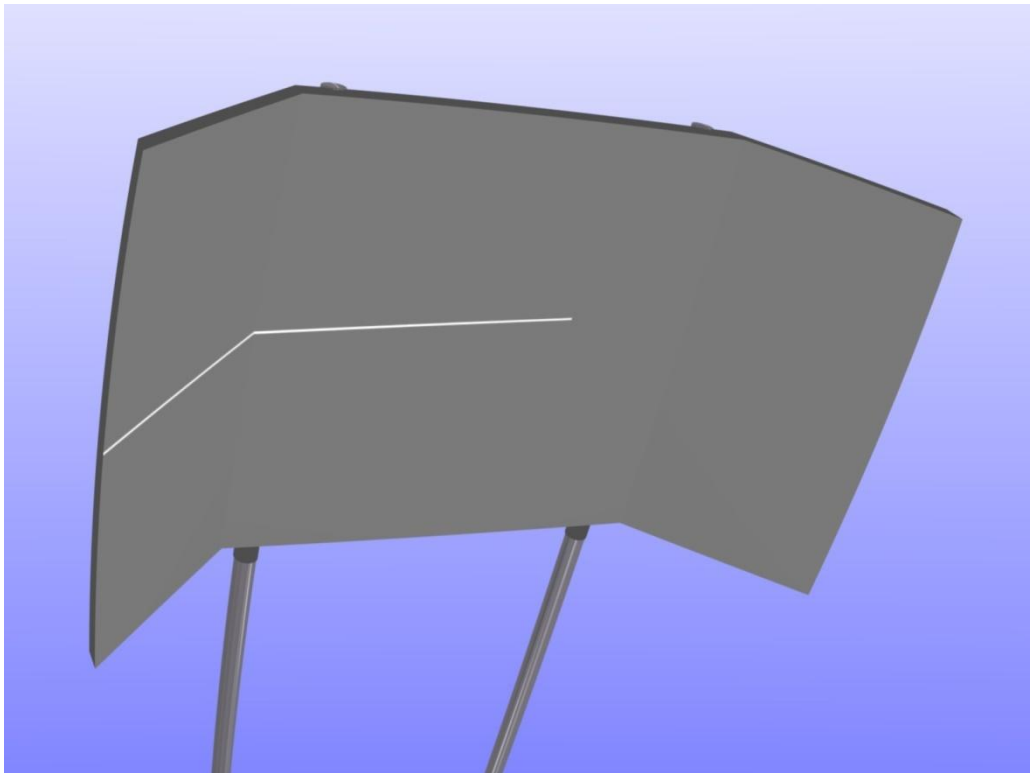

Abb. 7-69 Projektor 1, horizontaler Referenzstreifen.

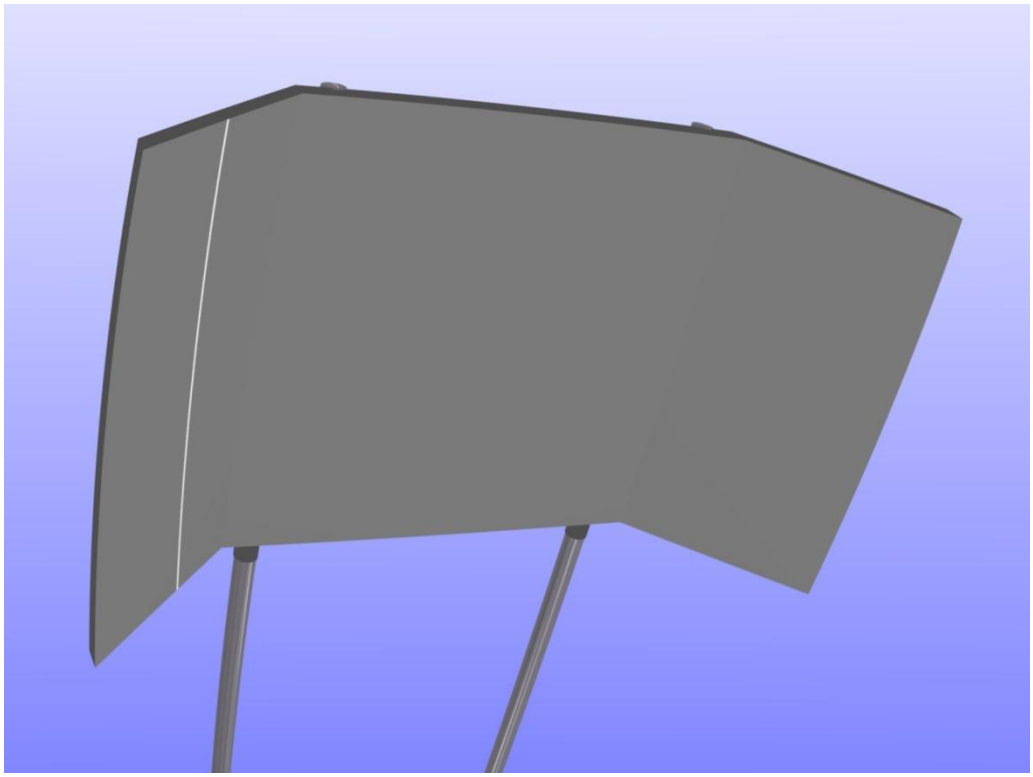

Abb. 7-70 Projektor 1, vertikaler Referenzstreifen.

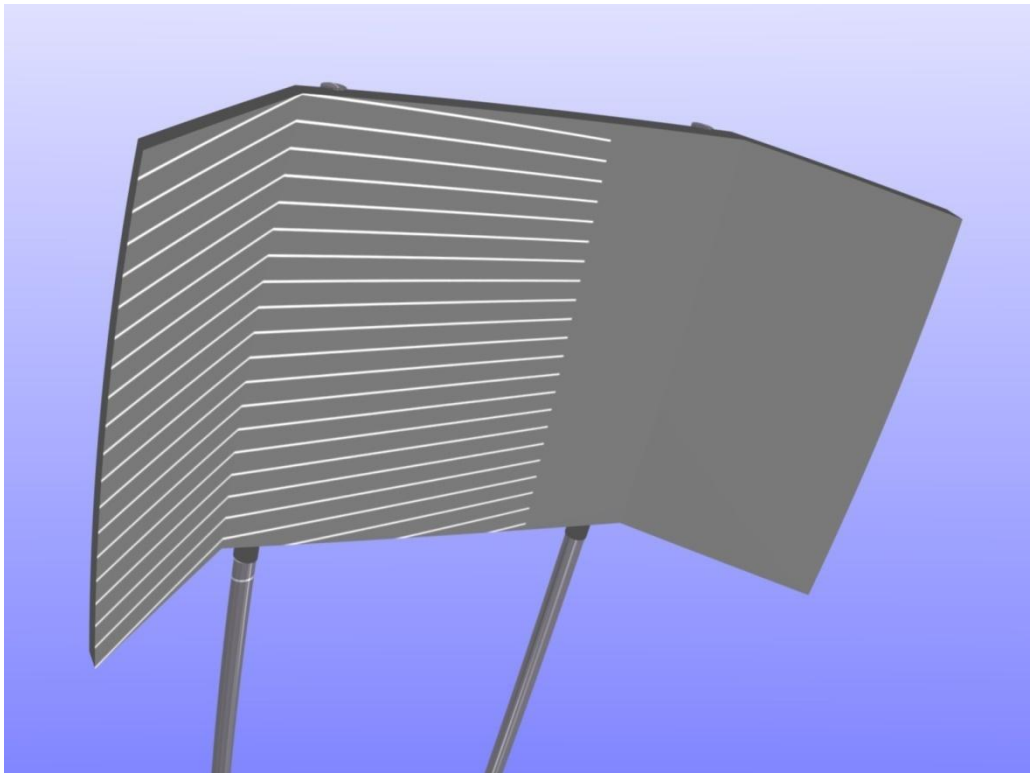

Abb. 7-71 Projektor 1, horizontale Kalibrierstreifen.

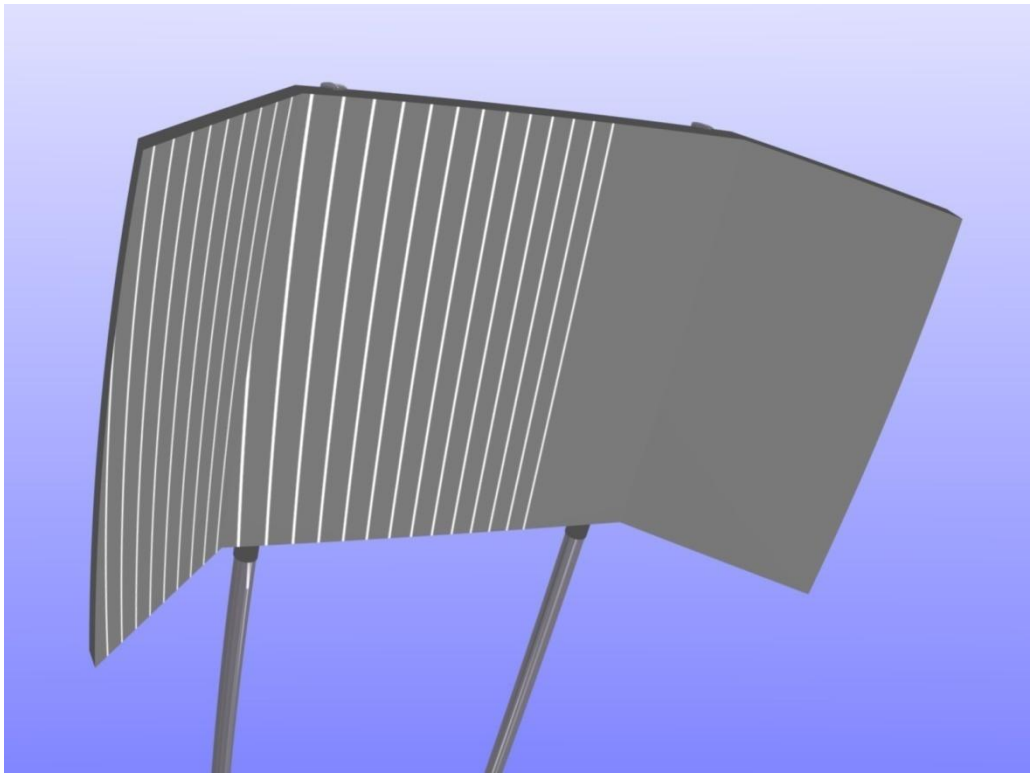

Abb. 7-72 Projektor 1, vertikale Kalibrierstreifen.

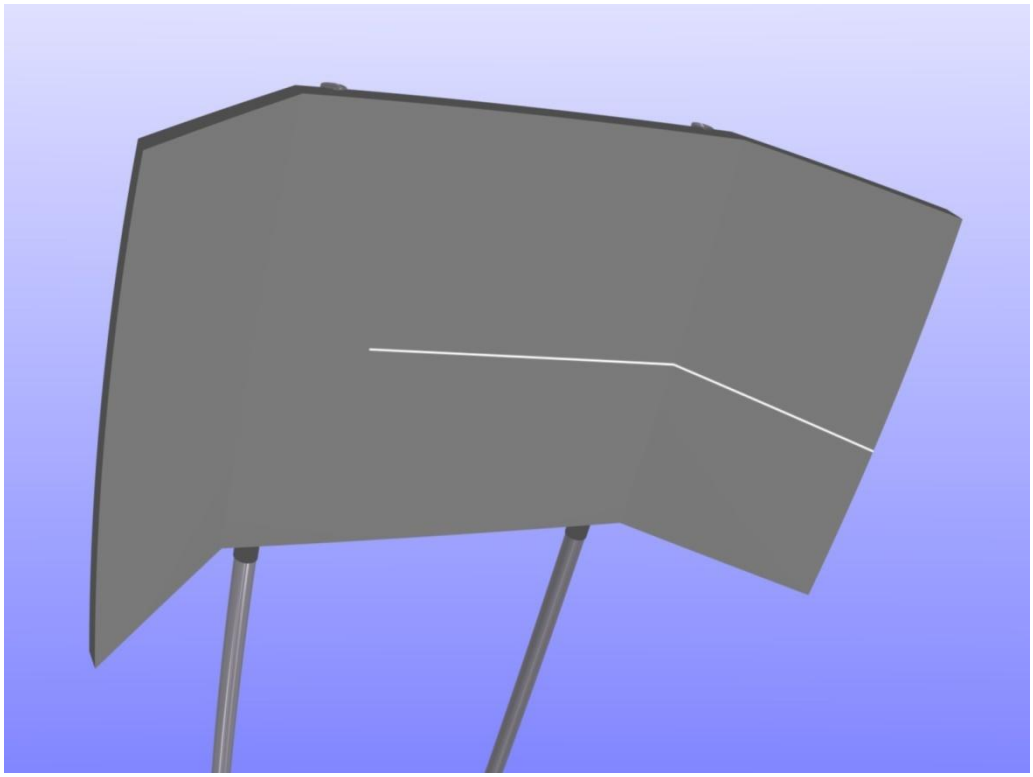

Abb. 7-73 Projektor 2, horizontaler Referenzstreifen.

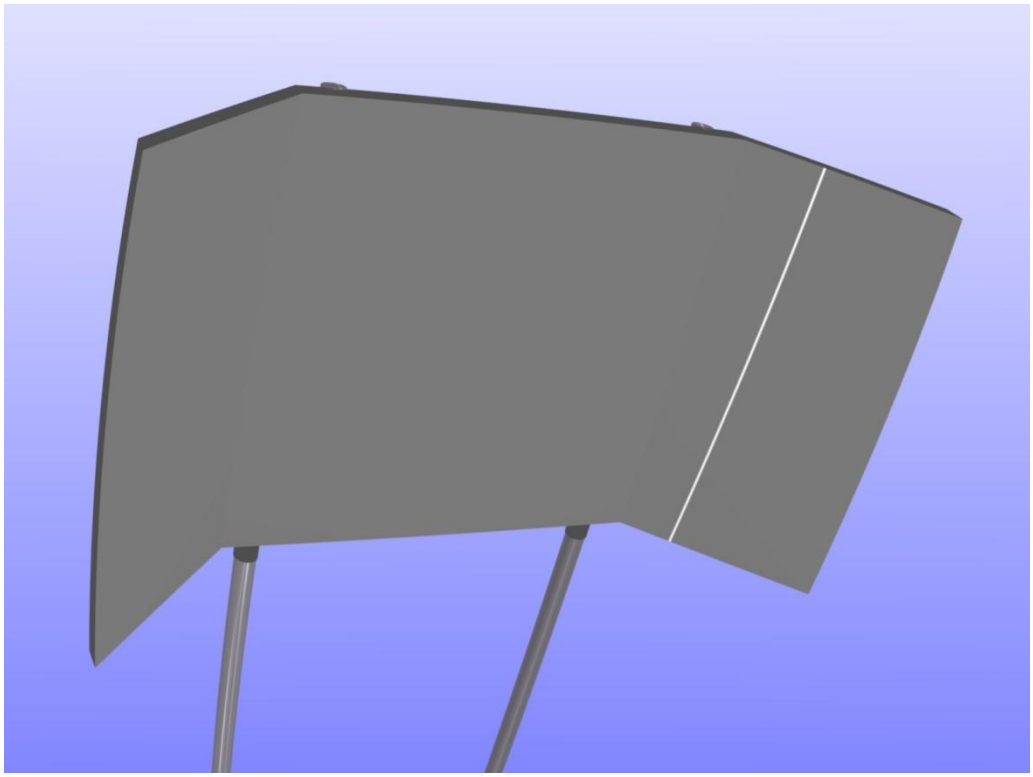

Abb. 7-74 Projektor 2, vertikaler Referenzstreifen.

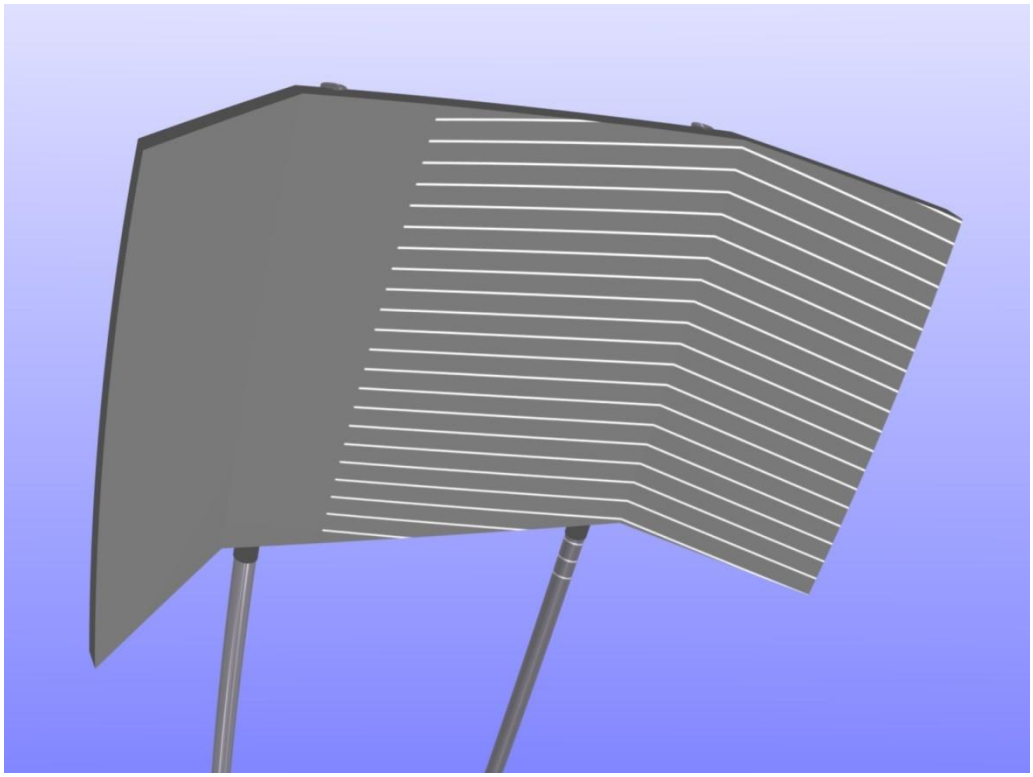

Abb. 7-75 Projektor 2, horizontale Kalibrierstreifen.

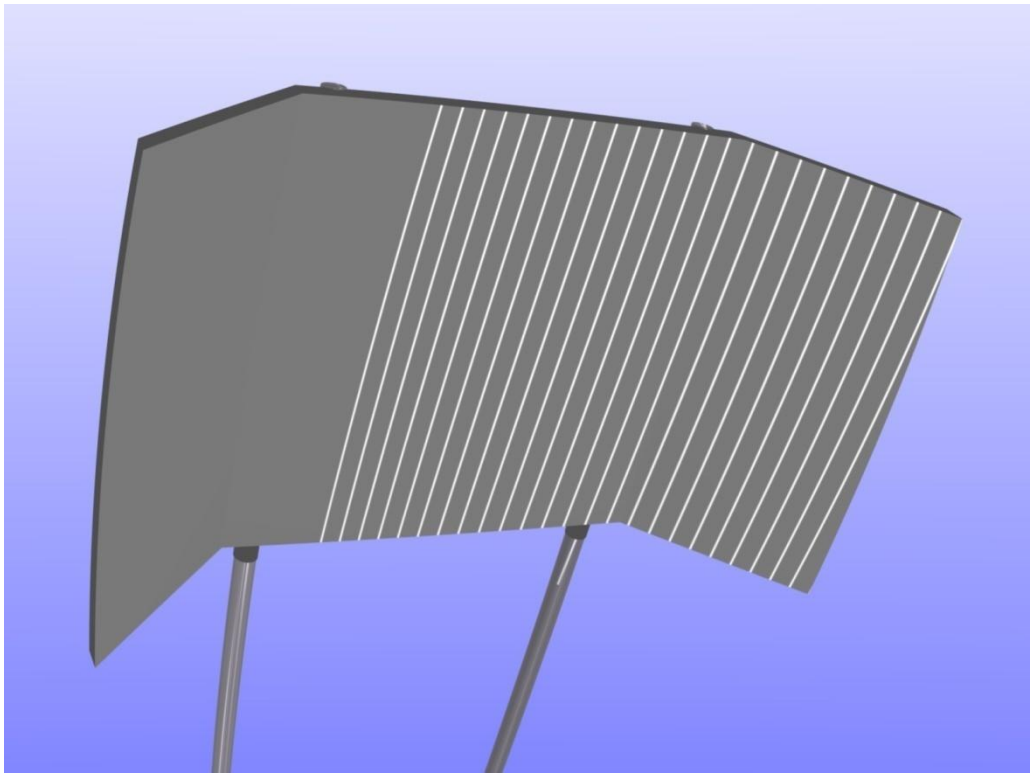

Abb. 7-76 Projektor 2, vertikale Kalibrierstreifen.

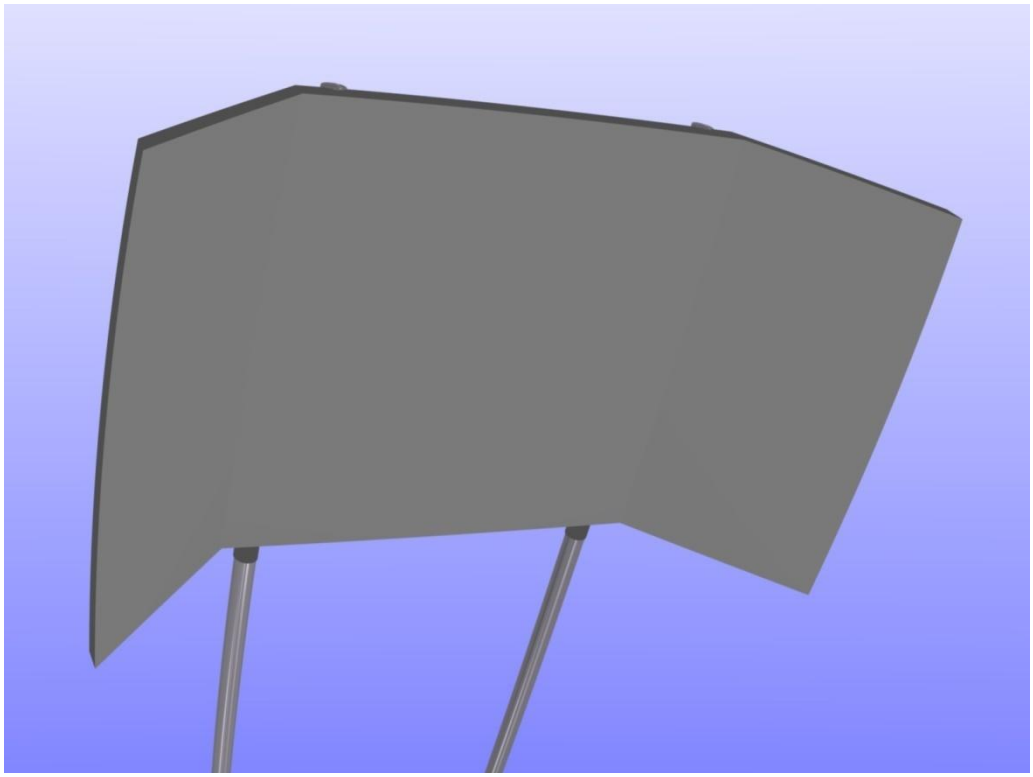

Abb. 7-77 Schwarzbild.

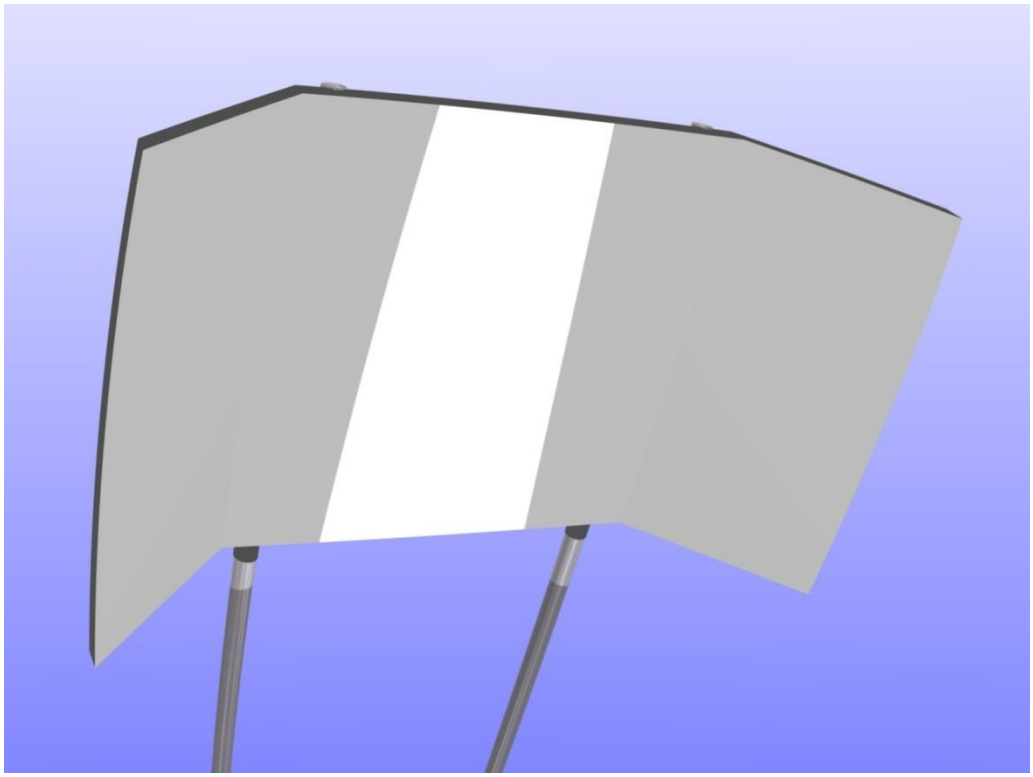

Abb. 7-78 Weißbild.

7.3.2 3D-Rekonstruktion

Bei der 3D-Rekonstruktion der Projektionsfläche werden zuerst die korrespondierenden Randpunkte (Kamerabild) als texturiertes Rechteck in den 3D-Raum transformiert. Die Ausrichtung dieses Rechtecks erfolgt senkrecht zur xy- und yz-Ebene. Der Mittelpunkt des Rechtecks liegt im Punkt (0, 0, 0). Zentral vor diesem Rechteck wird ein Kamerafluchtpunkt platziert. Der Abstand dieses Punktes wird mit Hilfe des Öffnungswinkels der Kamera bestimmt. Sei *a* die Breite des Fotos im 3D-Raum und *α* der Öffnungswinkel der Kamera so wird der gesuchte Abstand zwischen Kamerafluchtpunkt und Bildebene *d* anhand von Formel 7-55 bestimmt.

$$d = \frac{\frac{a}{2}}{\tan\frac{\alpha}{2}}$$

Formel 7-55 Abstand des Kamerafluchtpunktes zur Bildebene

Da zuvor die radiale Linsenverzerrung korrigiert wurde, kann nunmehr von einem Lochkameramodell ausgegangen werden. Es werden Strahlen von allen korrespondierenden Randpunkten zum Kamerafluchtpunkt gebildet. Jeweils zwei Strahlen, die von korrespondierenden Randpunkten ausgehen, bilden korrespondierende Strahlenpaare. Das zu rekonstruierende 3D-Modell wird durch diese korrespondierenden Strahlen begrenzt. Jeweils ein Punkt auf dem unteren und oberen Strahl des korrespondierenden Paares bilden einen Vektor. Dieser Vektor und der Nachbarvektor bilden ein Teilsegment (Face) des 3D-Modells.

Es gibt unendlich viele Lösungen, bei denen ein 3D-Modell in eine gültige 2D-Projektion überführt werden kann (siehe Abb. 7-79). Wird die Kamera als Lichtquelle interpretiert, entsprechen diese Lösungen 3D-Modellen, deren Schattenwurf dem Abbild der Projektionsfläche in der Bildebene entspricht.

Durch die bereits erwähnten Constraints wird allerdings eine gültige Lösung gefunden. Es existieren zwar immer noch unendlich viele Lösungen, die sich aber lediglich durch ihre Skalierung und die Translation zwischen Bildebene und Kamerafluchtpunkt unterscheiden (siehe Abb. 7-80).

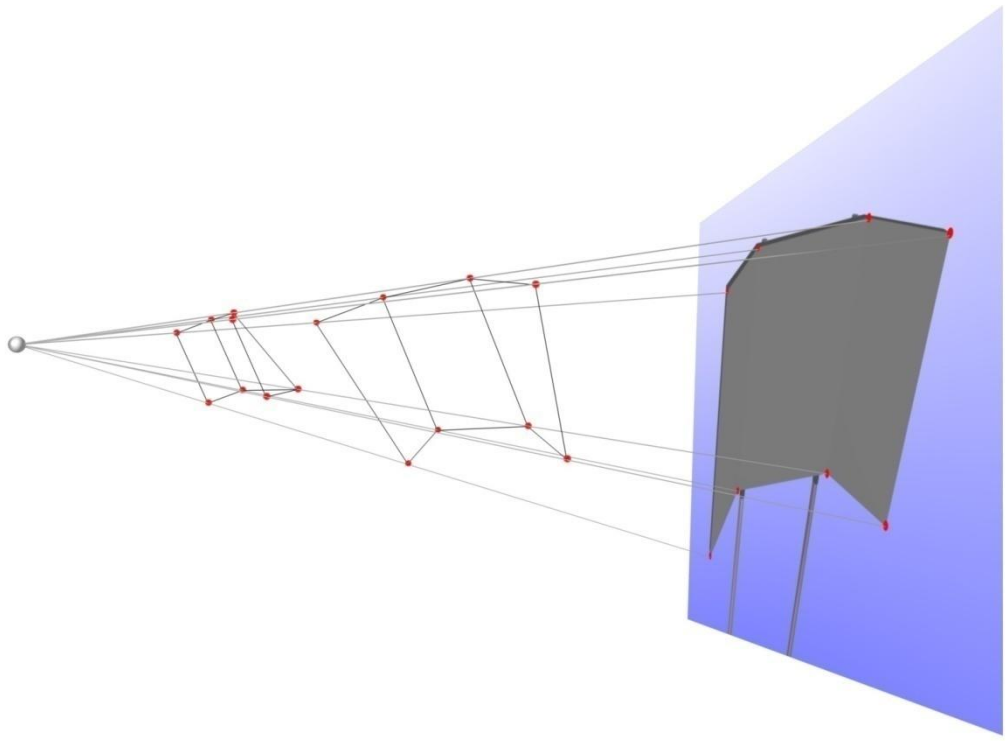

Abb. 7-79 Falsche Lösungen der 3D-Rekonstruktion.

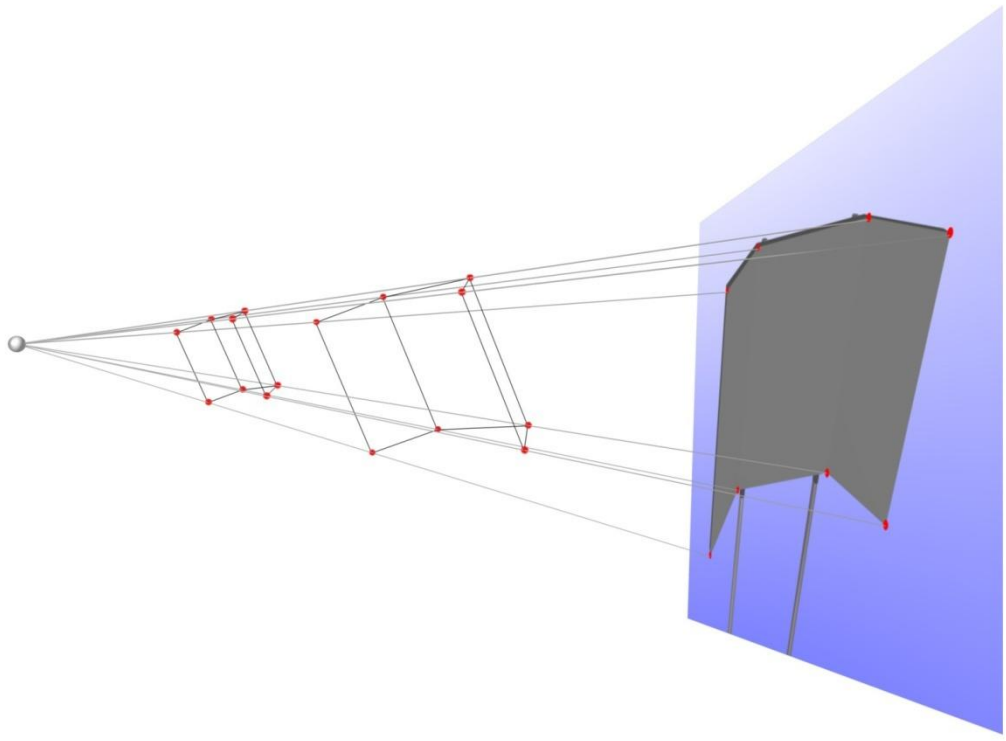

Abb. 7-80 Korrekte Lösungen der 3D-Rekonstruktion.

Um eine gültige Lösung zu finden, werden ein Initialisierungsschritt und ein Rekonstruktionsschritt durchgeführt. Beim Initialisierungsschritt handelt es sich um ein Optimierungsproblem. Es werden drei Stützvektoren gesucht, die folgenden Randbedingungen genügen müssen:

- Die Vektoren müssen jeweils die zwei korrespondierenden Strahlen verbinden.
- Die Vektoren sind parallel zueinander.
- Die Vektoren haben dieselbe Länge und
- stehen senkrecht auf der durch ihre Startpunkte aufgespannten Ebene.

Zuerst werden drei korrespondierende Randpunktpaare gewählt. Dies sind Start- und Endpunkt des linken und rechten Randes sowie das Paar mit dem größten z-Abstand zur Ebene, die durch den linken und rechten Rand aufgespannt wird.

Es werden initial drei Vektoren $\vec{v}_1$, $\vec{v}_2$ und $\vec{v}_3$ gebildet, die die zu ihren korrespondierenden Randpunktpaaren gehörigen Strahlen verbinden. Einer der Vektoren kann initial beispielsweise auf der halben Strecke zwischen Kamerafluchtpunkt und Abbildung platziert werden. Die anderen beiden Vektoren werden entsprechend den Randbedingungen „gleiche Länge“ und „Parallelität“ platziert.

Anschließend werden die drei Vektoren so lange modifiziert, bis sie allen vier Randbedingungen genügen. Die gefundenen drei Strecken sind äquivalent, d. h., sie sind bis auf eine Translation identisch (siehe Abb. 7-81 und Abb. 7-82).

Zur Überprüfung der Orthogonalität zur aufgespannten Ebene werden zwei Hilfsvektoren $\vec{v}_4$ und $\vec{v}_5$ bestimmt. Diese Vektoren verbinden den Startpunkt von $\vec{v}_1$ mit dem Startpunkt von $\vec{v}_2$ bzw. $\vec{v}_3$. Zwei Vektoren sind zueinander orthogonal, wenn das Skalarprodukt der beiden Vektoren null ergibt. Die Orthogonalität zu einer Ebene ist vorhanden, wenn die Skalarprodukte des betrachteten Vektors mit den diese Ebene aufspannenden Vektoren jeweils null ergeben. Aufgrund von Rundungsfehlern bzw. zur schnelleren Terminierung des Optimierungsverfahrens kann auch die Benutzung eines Abbruchschwellenwertes ε in Betracht gezogen werden (siehe Formel 7-56). Der Test auf Orthogonalität muss nur für einen Vektor erfolgen, da die Orthogonalität der beiden anderen Vektoren aufgrund deren Äquivalenz automatisch besteht.

$$\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_4 = 0 \ \wedge \ \vec{v}_1 \cdot \vec{v}_5 = 0$$

Formel 7-56 Überprüfung der Orthogonalität eines Vektors zu einer durch zwei Vektoren definierten Ebene.

Im anschließenden Rekonstruktionsschritt werden die Vektoren zwischen den restlichen korrespondierenden Strahlen bestimmt. Für diese Vektoren, die wiederum äquivalent zu den drei initialen Vektoren sind, gibt es jeweils nur eine gültige Lösung.

Anschließend wird aus sämtlichen Vektoren ein Drahtgittermodell erzeugt, das dem Modell der Projektionsfläche entspricht (siehe Abb. 7-83).

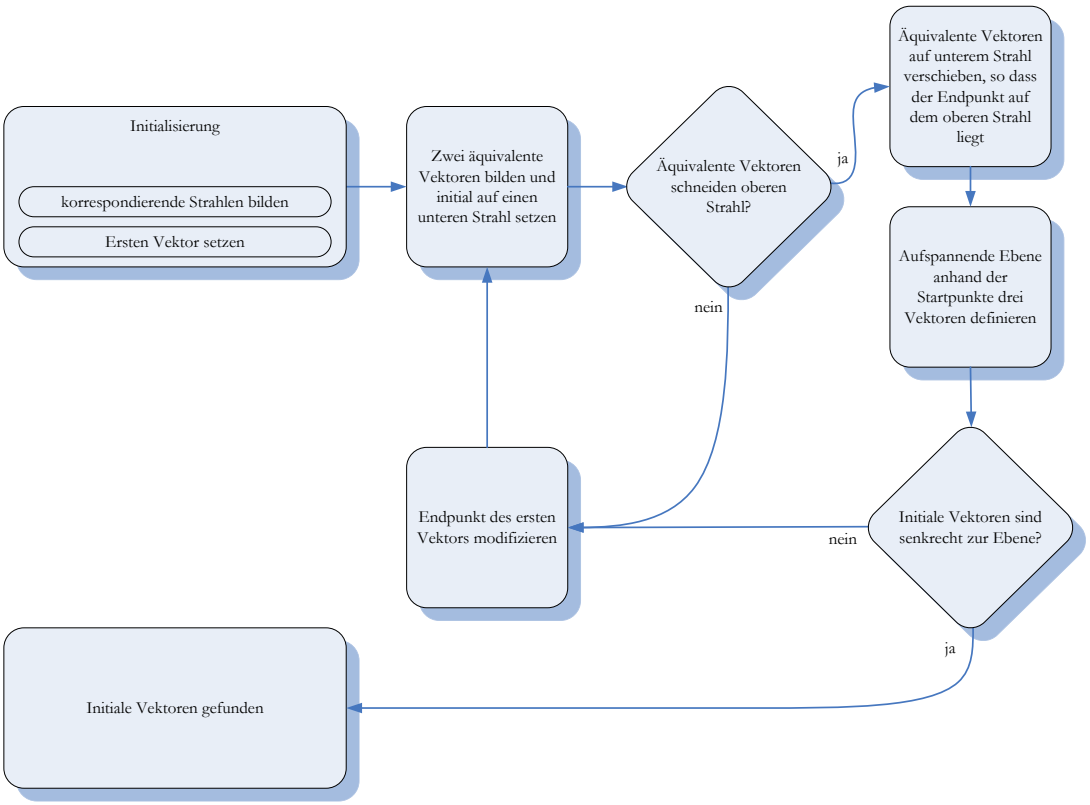

Abb. 7-81 Optimierung der initialen Vektoren.

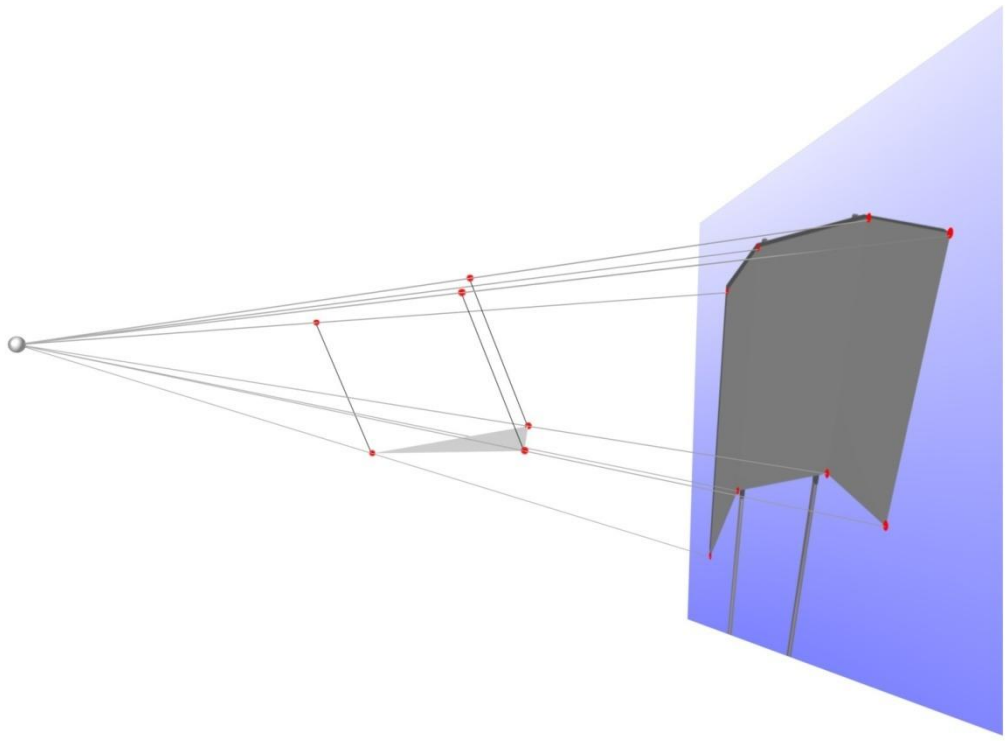

Abb. 7-82 Initialisierungsschritt der 3D-Rekonstruktion.

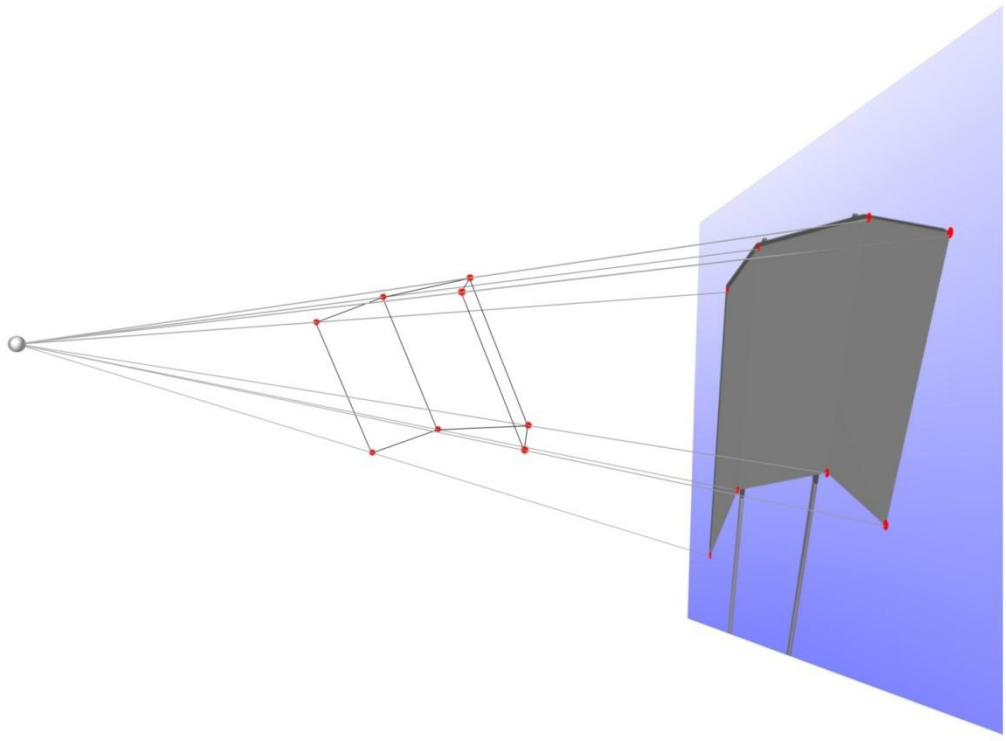

Abb. 7-83 Rekonstruiertes Drahtgittermodell.

7.3.3 Schnittpunktbestimmung der Kalibrierbilder

Die Schnittpunktbestimmung bei diesem Verfahren umfasst zwei Schritte:

- Bestimmung der Schnittpunkte der gefilterten Kalibrierstreifen im Bildraum
- Bestimmung der Schnittpunkte im 3D-Modell.

Der erste Schritt erfolgt wie bereits im Kapitel 4.1.2.8 und Kapitel 7.1.3 beschrieben. Aus denselben Gründen wie auch schon beim zweiten vorgestellten Verfahren müssen auch hier zusätzlich zu den gefundenen Schnittpunkten (siehe Abb. 7-84) weitere Schnittpunkte extrapoliert werden. Da weder die Form der Projektionsfläche noch der Verlauf der Kalibrierstreifen auf ihr bekannt sind, handelt es sich unter Umständen um eine nichtlineare Extrapolation. Dass eine derartige Extrapolation fehleranfällig sein kann, zeigt beispielsweise die Extrapolation von Börsenkursen mittels Trendlinien. Aus diesem Grund sollten – wie bereits erwähnt – möglichst wenige Werte extrapoliert werden.

Während beim zweiten vorgestellten Verfahren lediglich ein Skalierungsfaktor für die Bestimmung zu extrapolierender Schnittpunkte genügt (siehe Kapitel 4.1.2.8 sowie Kapitel 7.1.3), wird hier zusätzlich noch ein Winkel für die Richtungsänderung benötigt (siehe Formel 7-57).

$$\alpha = arccos\left(\frac{\vec{v}_{n-1} \cdot \vec{v}_{n-2}}{\|\vec{v}_{n-1}\| \cdot \|\vec{v}_{n-2}\|}\right)$$

Formel 7-57 Rotationswinkel für die Schnittpunktextrapolation.

Der anhand der Formel 7-54 bestimmte Schnittpunkt S_n muss um den letzten vorhandenen Schnittpunkt S_{n-1} und um den Winkel $-\alpha$ rotiert werden (siehe Abb. 7-85). Beträgt der Winkel null, ist die Lösung mit dem Ergebnis der bereits vorgestellten linearen Extrapolation identisch. Die Extrapolation kann natürlich auch unter Berücksichtigung einer größeren Anzahl von Schnittpunkten erfolgen.

Im zweiten Schritt der Schnittpunktbestimmung werden alle Strahlen, die von den Schnittpunkten im Bildraum zum Kamerafluchtpunkt führen, mit dem 3D-Modell geschnitten. Ein Schnittpunkt im Bildraum wird von zwei korrespondierenden Randpunktpaaren begrenzt. Diesen zwei Paaren ist ein rekonstruiertes Segment (Face) des 3D-Modells zugeordnet. Somit muss nur jeweils das Face getestet werden, das aus diesen Randpunktpaaren rekonstruiert wurde. Aus diesem Face werden zwei Dreiecke erzeugt. Die Schnittpunktbestimmung erfolgt nun anhand des Möller-Trumbore-Algorithmus (Möller 1997) für jedes der beiden Dreiecke. Die Schnittpunktbestimmung wird im Folgenden näher beschrieben.

Es sei *R(d)* ein Strahl mit dem Ursprung im Schnittpunkt *S* (in der in den 3D-Raum transformierten Abbildung) und der normalisierten Richtung *D* (zum Kamerafluchtpunkt).

$$R(d) = S + d \cdot D$$

Formel 7-58 Definition eines Strahls.

Es sei ein Dreieck durch seine drei Eckpunkte V_0, V_1 und V_2 gegeben und $P(u, v)$ ein Punkt innerhalb dieses Dreiecks, wobei u und v die baryzentrischen Koordinaten des Dreiecks sind.

$$P(u,v) = (1 - u - v) \cdot V_0 + u \cdot V_1 + v \cdot V_2$$

mit

$$u \geq 0, v \geq 0 \; und \; u + v \leq 1$$

Formel 7-59 Ein Punkt in einem Dreieck.

Der Schnitt zwischen Dreieck und Strahl wird wie folgt definiert.

$$R(d) = P(u,v)$$

Formel 7-60 Schnitt zwischen Strahl und Dreieck (1).

Durch Einsetzen der Therme aus Formel 7-58 und Formel 7-59 folgt.

$$S + d \cdot D = (1 - u - v) \cdot V_0 + u \cdot V_1 + v \cdot V_2$$

Formel 7-61 Schnitt zwischen Strahl und Dreieck (2).

Diese Formel kann in Matrixschreibweise umgeformt werden.

$$[-D \quad V_1 - V_0 \quad V_2 - V_0] \cdot \begin{bmatrix} d \\ u \\ v \end{bmatrix} = S - V_0$$

Formel 7-62 Schnitt zwischen Strahl und Dreieck (3).

Formel 7-62 kann mit Hilfe der Cramerschen Regel folgendermaßen umformuliert werden.

$$\begin{bmatrix} d \\ u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{A \cdot E_1} \cdot \begin{bmatrix} B \cdot E_2 \\ A \cdot E_3 \\ B \cdot D \end{bmatrix}$$

mit

$$A = D \times E_2$$

$$B = E_3 \times E_2$$

und

$$E_1 = V_1 - V_0$$

$$E_2 = V_2 - V_0$$

$$E_3 = S - V_0$$

Formel 7-63 Baryzentrischer Schnittpunkt von Strahl und Dreieck.

Aus den so bestimmten baryzentrischen Koordinaten *u* und *v* kann der Schnittpunkt *P(u, v)* leicht anhand der Formel 7-59 bestimmt werden.

Liegt der zu extrapolierende Punkt außerhalb der Projektionsfläche (im Bildraum), kann kein Schnittpunkt mit einem Segment des rekonstruierten 3D-Modells gefunden werden. In diesem Fall erfolgt eine lineare Verlängerung bzw. Verbreiterung des Segmentes, über bzw. neben dem der zu extrapolierende Schnittpunkt liegt.

Die Schnittpunkte mit dem 3D-Modell der Projektionsfläche werden abschließend in Arrays gespeichert.

Ein Beispiel für die Schnittpunktbestimmung eines im Bildraum vorliegenden Schnittpunktes wird in Abb. 7-86 dargestellt.

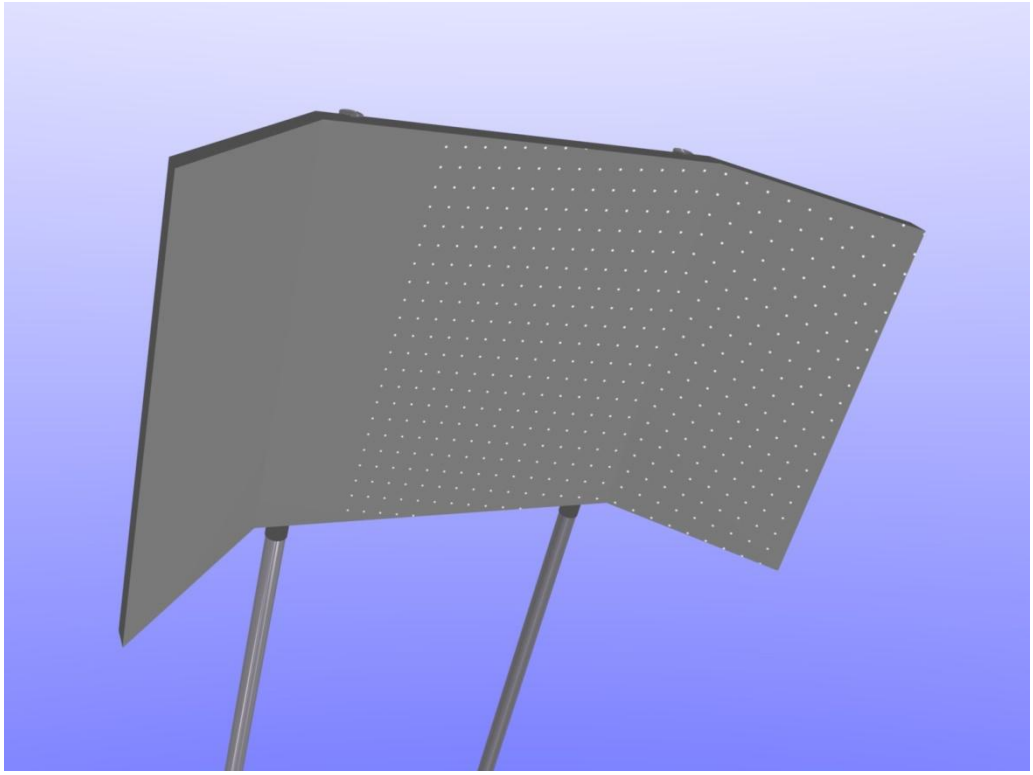

Abb. 7-84 Schnittpunkte einer Teilprojektion.

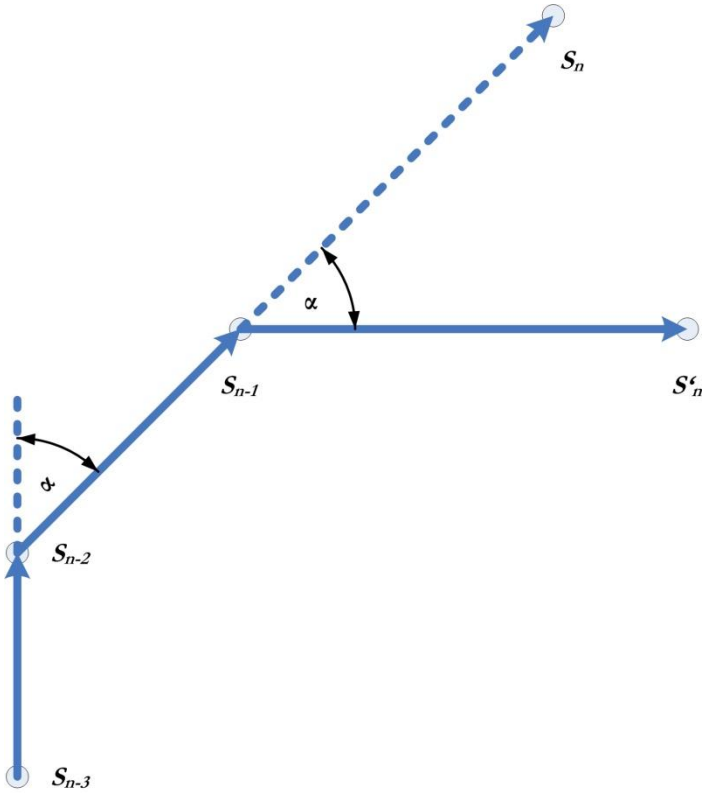

Abb. 7-85 Nichtlineare Schnittpunktextrapolation.

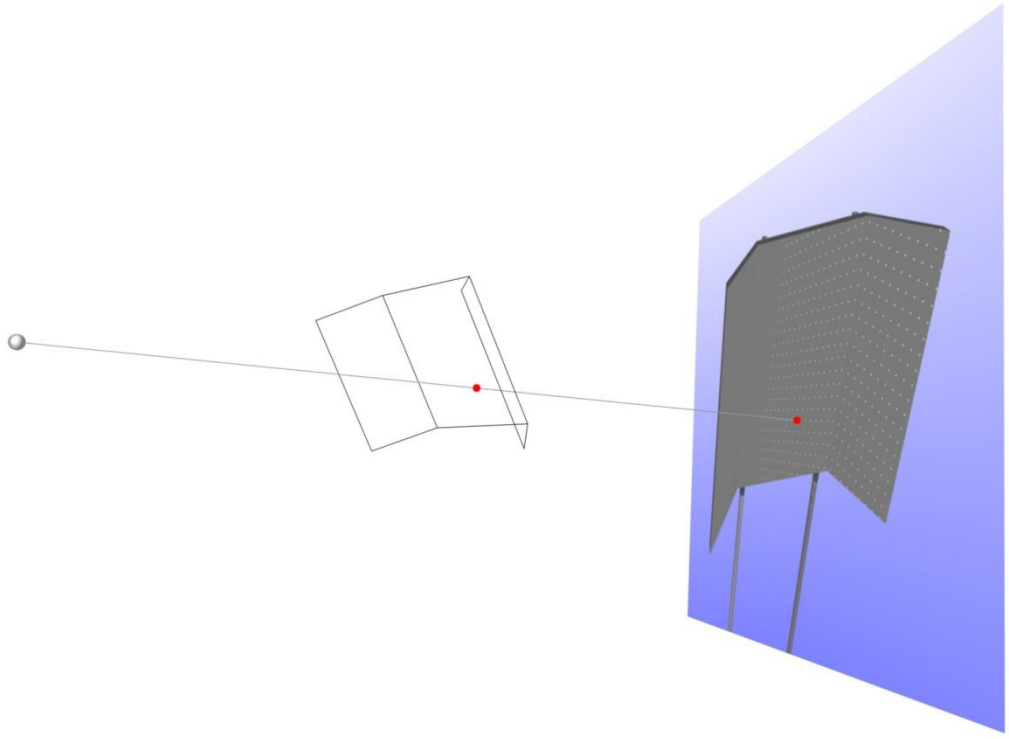

Abb. 7-86 Position eines Schnittpunktes im 3D-Modell.

7.3.4 Parameter für die Bildkorrektur

Wie auch schon beim in Kapitel 4.1.2.9 beschriebenen Verfahren wird auch beim hier vorgestellten Algorithmus die größtmögliche Projektionsfläche durch den Rand der physikalischen Projektionsfläche definiert. Die Bildinhalte der Teilprojektion müssen derart modifiziert werden, dass die Gesamtprojektion – ähnlich einer Tapete – auf der Projektionsfläche „abgerollt" wird. Auch bei diesem Verfahren werden dafür Warping- und Blending-Parameter bestimmt.

Im Gegensatz zu den ersten beiden Verfahren können die uv-Parameter der Schnittpunkte nicht direkt im Bildraum und auch nicht unter Zuhilfenahme einer Homographie-Transformation bestimmt werden. Allerdings existieren aufgrund der erfolgten 3D-Rekonstruktion und der nachfolgenden Schnittpunktbestimmung diese Schnittpunkte als 3D-Koordinaten. Des Weiteren ist von jedem Schnittpunkt – sowohl im Bildraum als auch im 3D-Raum – bekannt, zu welchem Segment der Projektionsfläche dieser gehört.

Das rekonstruierte 3D-Modell besteht aus *n* Segmenten Seg_i. Die Höhe *h* dieses Modells ist aufgrund der Constraints der Projektionsfläche für jedes der Segmente identisch. Es sei *w* die Summe der Breite aller Segmente. Es seien *S* ein Schnittpunkt im *m.* Segment Seg_m und die Abstände von *S* zum unteren und linken Rand des aktuellen Segments mit *a* und *b* bekannt. Entsprechen weiterhin die linke untere Ecke des 3D-Modells der uv-Koordinate *(0, 0)* und die rechte obere Ecke der uv-Koordinate *(1, 1)*, so wird die uv-Koordinate des aktuell betrachteten Schnittpunkts wie folgt bestimmt (siehe Abb. 7-87).

$$u = \frac{w_{cur}}{w}$$

mit

$$w_{cur} = \sum_{i=0}^{m-1} w(Seg_i) + a$$

und

$$w = \sum_{j=0}^{n} w(Seg_j)$$

Formel 7-64 Bestimmung der u-Koordinate.

$$v = \frac{b}{h}$$

Formel 7-65 Bestimmung der v-Koordinate.

Nach Bestimmung der uv-Koordinaten werden die Blendbilder analog zu dem bereits beschriebenen Verfahren aus Kapitel 4.1.1.7 bzw. Kapitel 7.1.5 bestimmt. Die Echtzeitanwendung der Parameter erfolgt wiederum wie in den Kapiteln 4.1.1.8 und 7.1.6 beschrieben.

Abb. 7-87 Bestimmung der uv-Koordinate im rekonstruierten 3D-Modell.

8 Quellen- und Literaturverzeichnis

3D-Film. http://de.wikipedia.org/wiki/3D-Film (letzter Aufruf 12.11.2010).

3DPercept. MegaWall2. http://www.3d-perception.com/docs/MW2_Brochure_2010_web.pdf. Datenblatt, 2010 (letzter Aufruf 09.03.2010).

3DPercept. Simulation. http://www.3d-perception.com/docs/SimulationLow.pdf. Datenblatt, 2010 (letzter Aufruf 09.03.2010).

5DT. Fifth Dimension Technologies, 5DT Data Glove Ultra Series. Datenblatt, 2007.

Agarwal A, Jawahar CV, Narayanan PJ. A Survey of Planar Homography Estimation Techniques. 2005.

Ashdown M, Flagg M, Sukthankar R, Rehg JM. A flexible projector-camera system for multi-planar displays. In: Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Volume II, 2004: 165-172.

Barco. ScreenSHAPER. http://www.barco.com/events/en/products/product.asp?GenNr=1494 (letzter Aufruf 09.03.2010).

Bässmann H, Kreyss J. Bildverarbeitung Ad Oculus. Springer, 2004. ISBN 3-540-21029-6.

Bebis G. Singular Value Decomposition. Vorlesung, 2003.

Bergen P, van. Vergleichsstudie endoskopischer 2-D- und 3-D-Videosysteme. Doktorarbeit, Universität Tübingen, 1999.

Beyer G, Isaković K, Klose S. Die Digitale Litfaßsäule als interaktives Werbemedium. Workshop-Proceedings der Tagung Mensch & Computer 2009, Logos Verlag, Berlin, 2009.

Beyer G, Alt F, Müller, J, Schmidt, A, Isaković, K, Klose, S, Schiewe, M, Haulsen, I. Audience behavior around large interactive cylindrical screens. Proceedings of the 2011 annual conference on Human factors in computing systems, CHI '11, ACM, 2011:1021–1030.

Biehling W, Deter C, Dube S, Hill B, Helling S, Isaković K, Klose S, Schiewe M. LaserCave - Some Building Blocks for Immersive Screens. VR/AR Statustagung, 2004.

Bimber O, Emmerling A, Klemmer T. Embedded Entertainment with Smart Projectors. In: IEEE Computer 2005; 1: 56-63.

Bitmgmt: Bitmanagement. Stereoskopische 3D Darstellungen. Whitepaper, Juni 2006.

Bollhoefer KW, Meyer K, Witzsche R. Microsoft Surface und das Natural User Interface (NUI). White Paper, 04.02.2009.

Boosmann T. Multispektrale Farbreproduktion: Projektionssystem und Algorithmen für eine additive, multispektrale Farbsynthese. Doktorarbeit, Technische Hochschule Aachen, Shaker Verlag, Aachen, 2007.

Bresenham, JE. Algorithm for Computer Control of a Digital Plotter. IBM Systems Journal, 1965; 4(1).

Bunks C. Grokking the GIMP. Sams, 15.02.2000. ISBN 978-0735709249.

CA. http://de.wikipedia.org/wiki/Chromatische_Aberration (letzter Aufruf 05.03.2010).

CIE, Commission Internationale de l'Eclairage Proceedings. Cambridge University Press, 1926.

Collins CM. Projector Gamma Adjustment. http://myhometheater.homestead.com/gamma.html, 2002. (letzter Aufruf 08.10.2009).

Coolux. Pandora's Box Brochure. http://www.coolux.de/root/downloads/Brochure_v4_72dpi.pdf, 2008. (letzter Aufruf 27.05.2009).

Coppola DM, White LE, Fitzpatrick D, Purves D. Unequal distribution of cardinal and oblique contours in ferret visual cortex. In Proceedings of the National Academy of Sciences, 95, 1998.

DA-LITE. Picture King Extra Heavy Duty Tripod Portable Screen with Keystone Eliminator, Specification Data, http://www.dalite.com/products/spec_pdfs/83.pdf, 2/2008, (letzter Aufruf 05.03.2010).

Dataton. Watchout Multi Display Software. http://www.dataton.com/watchout, (letzter Aufruf 09.03.2009).

Demant C, Streicher-Abel B, Waszkewitz P. Industrielle Bildverarbeitung. Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert. Springer, 2002. ISBN 3-540-41977-2.

Dolby3D. Dolby – Dolby 3D Digital Cinema. http://www.dolby.com/professional/solutions/cinema/3d-digital-cinema.html. (letzter Aufruf 30.03.2011).

Dubrofsky E. Homography Estimation, Master's Essay, The University of British Columbia, Vancouver, März 2009.

Dumitrescu A. Balance Board Adapted to World of Warcraft. Softpedia News, http://news.softpedia.com/news/Balance-Board-Adapted-to-World-of-Warcraft-88252.shtml, 18.06.2008. (letzter Aufruf 11.09.2009).

Fisher R, Perkins S, Walker A, Wolfart A. Morphology. http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/morops.htm, 2003. (letzter Aufruf 19.09.2009).

Fox T. Calit2 Visualization Team Develops 3-D Technology from Modified HDTV LCD Screens. UCSanDiego News Center, http://ucsdnews.ucsd.edu/newsrel/general/08-09NexCave.asp, 17.08.2009. (letzter Aufruf 08.04.2010).

Furtner U. Farbverarbeitung mit Bayer-Mosaic Sensoren. Matrix Vision Bildverarbeitung, 31.08.2001.

Gerhardt J, Klose S, Schiewe M, Ahlers KI, Dingeldey F, Haulsen I. Immersive Interactive Multimedia-playout System For Events. IBC2010 Conference Proceedings, September 2010.

Gerhardt J, Schiewe M, Peikert S, Klose S. Automatic blending for arbitrary-shaped projection surfaces. Berichte aus der Informatik: Virtuelle und Erweiterte Realität, 7. Workshop der GI-Fachgruppe VR/AR, Tagungsband, Shaker Verlag, 27.-28.09.2010:9-20. ISBN 978-3-8322-9468-7.

Goldstein EB. Wahrnehmungspsychologie – Der Grundkurs. 7. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, 2008. ISBN 978-3-8274-1766-4.

Grosse M, Bimber O. Coded Aperture Projection. Emerging Display Technologies and Immersive Projection Technologies 2008 (EDT IPT08), 2008.

Grosse M, Wetzstein G, Grundhoefer A, Bimber O. Coded Aperture Projection. ACM Transactions on Graphics (to appear), 2009.

Grüttner S. Entwicklung und Evaluierung von verschiedenen Interaktionsparadigmen für das VR Objekt Display. Diplomarbeit, Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 18.11.2004.

Guedry FE. Conflicting Sensory Orientation Cues as a Factor in Motion Sickness. In: Fourth Symposium on the Role of the Vestibular Organs in Space Exploration, NASA SP-187, Session II, 24.-26.09.1968.

Gunturk BK, Glotzbach J, Altunbasak Y, Schafer RW, Mersereau RM. DeMosaicking: Color Filter Array Interpolation in Single-Chip Digital Cameras, IEEE Signal Processing Magazine (Special Issue on Color Image Processing), 2005; 1.

Halo. http://www.dvdboard.de/forum/dvdreviews/bildbewertung.html (letzter Aufruf 05.03.2010).

Han JY. Low-Cost Multi-Touch Sensing through Frustrated Total Internal Reflection, UIST'05, ACM 1-59593-023-X/05/0010, 23.-27.10.2005.

Haulsen I. Surround Vision – Neue Wege des immersiven Kinos. In: FKT, 2007; 8-9: 429-434.

Haulsen I. Projektion auf beliebige Flächen. In: Production Partner, Sonderdruck aus Production Partner, 2008; 2: 1-4.

Heuvel FA, van den, Verwaal R, Beers B. Calibration of Fisheye Camera Systems and the Reduction of Chromatic Abberation. Proceedings of the ISPRS Commission V Symposium „Image Engineering and Vision Metrology", 25-27.09.2006.

Hoffmann R. Entwicklung eines Autofokusalgorithmus für den Einsatz in der medizinischen Endoskopie. Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, 20.07.2009.

Holografika: Holografika, LG. HoloVizio™ 3D display receives LG projector base, Pressemitteilung, 10.02.2009.

Infitec. Die Technologie der Wellenlängenmultiplex Visualisierungssysteme. Informationsbroschüre.

Isaković K, Dudziak T, Köchy K. X-Rooms A PC-based immersive visualization environment. Web3D'02, ACM1-58113-468-1/02/0002, 24.-28.02.2002.

JEITA (Standard of Japan Electronics and Information Technology Industries Association). Exchangeable image file format for digital still cameras: Exif Version 2.2. JEITA CP-3451, April 2002.

Jorke H, Fritz M. A New Stereoscopic Visualization Tool by Wavelength Multiplex Imaging. Proceedings Electronic Displays, September 2003.

Klette R, Koschan A, Schlüns K. Computer Vision – Räumliche Information aus digitalen Bildern, Vieweg Technik, 1996. ISBN 3-528-06625-3.

Klose S. Autokalibrierung von Multiprojektorsystemen. Patentschrift, DE 102 51 217 B3, eingereicht am 31.10.2002, veröffentlicht am 24.06.2004.

Klose S. Autokalibrierung von Multiprojektorsystemen. Patentschrift, EP 1 434 434 A1, eingereicht am 29.10.2003, veröffentlicht am 30.06.2004.

Klose S. Auto-Calibration of Multi-Projector Systems. Patentschrift, US 2005/0083402 A1, eingereicht am 30.10.2003, veröffentlicht am 21.04.2005.

Klose S. System und Verfahren zur automatischen Kalibrierung einer Projektion, sowie eine Verwendung des Systems. Patentschrift, DE 10 2005 037 797 A1, eingereicht am 03.08.2005, veröffentlicht am 08.02.2007.

Klose S. Verfahren und Vorrichtungen zum Erzeugen einer kalibrierten Projektion. Patentanmeldung, DE 10 2009 046 114.0, eingereicht am 28.10.2009.

Klose S. Constraint-basierte 3D-Rekonstruktion und automatische Kalibrierung von Multiprojektorsystemen. 3D-NordOst 2009, 12. Anwendungsbezogener Workshop zur Erfassung, Modellierung, Verarbeitung und Auswertung von 3D-Daten, Tagungsband, 10./11.12.2009: 61-70.

Klose S. AutoCalib3D: Constraint-basierte, automatische Kalibrierung von Multiprojektorsystemen bezüglich dreidimensional-verformter, markerloser Projektionsflächen. Berichte aus der Informatik: Virtuelle und Erweiterte Realität, 7. Workshop der GI-Fachgruppe VR/AR, Tagungsband, Shaker Verlag, 27.-28.09.2010:33-45. ISBN 978-3-8322-9468-7.

Klose S, Gerhardt J, Engelke T, Kuijper A. Automatic Multi-Projector Calibration – A Review of Systems for Non-experienced Users. GRAPP 2011, proceedings, 05.-07.03.2011: 286-295.

Kücholl M. Konzeption und Modellierung virtueller Bühnen. Diplomarbeit, Technische Fachhochschule Berlin, 16.02.2004.

Lavry D. Sampling Theory for Digital Audio. Lavry Engineering, Inc., 2004.

Lee JC. Johnny Chung Lee > Projects > Wii. http://johnnylee.net/projects/wii/, 2008 (letzter Aufruf 05.03.2010).

Lee JC, Dietz PH, Maynes-Aminzade D, Raskar R, Hudson SE. Automatic Projector Calibration with Embedded Light Sensors. 2004.

Lee JC. Hacking the Nintendo Wii Remote. IEEE Pervasive Computing, Vol. 7 no. 3, Juli-September 2008.

Livingston MA, Ellis SR, White SM, Feiner SK, Lederer A. Vertical Vergence Calibration for Augmented Reality Displays. In: IEEE Virtual Reality Conference (VR 2006), 2006: 287-288.

Luma. http://en.wikipedia.org/wiki/Luma_(video), (letzter Aufruf 19.09.2009).

Mach E. Über die Wirkung der räumlichen Vertheilung des Lichtreizes auf die Netzhaut. Sitzungsberichte der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, mathematisch-naturwissenschaftliche Classe, 52, 1865: 303-322.

Majumber A, Brown MS. Practical Multi-Projector Display Design. A K Peters, Ltd., 2007. ISBN 978-1-56881-310-3.

Matlab. http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/images/rgb2gray.html, (letzter Aufruf 19.09.2009).

Matrox. Matrox Monitor Bezel Management TripleHead2Go Digital Edition. White Paper, http://www.matrox.com/graphics/media/pdf/products/gxm/Matrox_Monitor_Bezel_Management_White_Paper.pdf, (letzter Aufruf 05.03.2010).

Microsoft Photosynth. What is Photosynth?. http://photosynth.net/about.aspx. (letzter Aufruf 14.04.2010).

Möller T, Trumbore B. Fast, Minimum Storage Ray-Triangle Intersection. Journal of Graphics Tools, Vol. 2, no. 1, 1997.

Murr S. 3D-Kino mit Schwächen. Bild der Wissenschaft, 2009: 3; 104.

Mützel A. Die Homographie zwischen 2D-Bildern. Proseminar Erkennen von Gebäuden in Einzelbildern, 22.04.2009.

NEC. Take the Technology Tour. http://www.nec-pj.com/technology/setup.html, (letzter Aufruf 09.03.2010).

NewSight. Frequently Asked Questions MultiView Displays http://www.newsight.com/support/faqs/autostereoscopic-displays.html, (letzter Aufruf 08.09.2009).

Nyquist H. Certain Topics in Telegraph Transmission Theory. Winter Convention of the A.I.E.E. New York, 13.-17.02.1928, Reprinted from Transactions of the A.I.E.E., IEEE, 2002.

Optik. Institution of Cell Imaging and Ultrastructure Research, Division of Cell Physiology and Scientific Film, Fotografie – Licht & Optik. Skript Universität Wien.

Palmer S. Common region: a new principle of perceptual grouping. In Cognitive Psychology, 24, 1992.

Palmer S, Rock I. Rethinking perceptual organization: The role of uniform connectedness. In Psychonomic Bulletin & Review, 1, 1994.

Peters K. Wissenschaft im freien Fall. T-Online Nachrichten, http://nachrichten.t-online.de/c/18/19/91/14/18199114.html, 24.03.2009. (letzter Aufruf 10.09.2009).

Pinhanez C. The Everywhere Display Projector: A Device to Create Ubiquitous Graphical Interfaces. Proceedings of Ubiquitous Computing, 2001.

Polhemus. Motion Tracking Case Studies. http://www.polhemus.com/?page=Motion_Case_Studies, (letzter Aufruf 05.03.2010).

Poynton C. Frequently Asked Questions about Color. 30.12.1999.

Raskar R, Low KL, Welch G. Shader Lamps Animating Real Objects with Image-Based Illumination. April 2000.

Raskar R, Brown MS, Yang R, Chen WC, Welch G, Towles H, Seales B, Fuchs H. Multi-Projector Displays Using Camera-Based Registration. In: SIGGRAPH 2002, Course 55 Notes, 2002.

Raskar R, vanBaar J, Beardsley P. Display Grid: ad-hoc Clusters of Autonomous Projectors. Society for Information Displays International Symposium (SID), Mai 2004.

Raskar R, vanBaar J, Beardsley P, Willwacher T, Rao S, Forlines C. iLamps: Geometrically Aware and Self-Configuring Projectors. ACM SIGGRAPH, Article 7, Juli 2006. ISBN: 1-59593-364-6.

Rekimoto J, Ayatsuka Y. CyberCode: Designing Augmented Reality Environments with Visual Tags. Proceedings Designing Augmented Reality Environments, ACM Press, 2000.

Relke I. Autostereoskopische Projektionsanordnung. Patentschrift, WO 2004/008779 A2, 22.01.2004.

Rodehorst V. Photogrammetric Computer Vision. Vorlesung, WS 2008/2009, TU Berlin.

Rupprecht JM. Was zeigt eigentlich das Histogramm. http://www.digitalkamera.de/Fototipp/Was_zeigt_eigentlich_das_Histogramm_/1970.aspx, 03.11.2003. (letzter Aufruf 18.09.2009).

Sabri AJ, Ball RG, Fabian A, Bhatia S, North C. High-resolution gaming: Interfaces, notifications, and the user experience. Interacting with Computers, 2007: 19.

Sajadi B, Majumder A. Markerless View Independent Geometric Registration of Multiple Distorted Projectors on Vertically Extruded Surfaces Using a Single Uncalibrated Camera. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2009: 15(6):1307-1316.

Sajadi B, Majumder A. Auto-Calibration of Cylindrical Multi-Projector Systems. IEEE Virtual Reality, 2010.

Savov V. ATI's six-screen Eyefinity madness review, fatal flaw found. http://www.engadget.com/2010/02/26/atis-six-screen-eyefinity-madness-reviewed-fatal-flaw-found, 26.02.2010. (letzter Aufruf 05.03.2010)

Schiewe M, Klose S. Calibration Method and Calibration System for Projection Apparatus. Patentschrift, WO 2007/082690 A1, eingereicht am 13.01.2006, veröffentlicht am 26.07.2007.

Seales WB, Landon GV. The Museum and the Media Divide – Building and Using Digital Collections at the Instituto de Cultura Puertorriquena. D-Lib Magazine, Volume 11 Number 5, Mai 2005.

Sensor01. 3-Chip CCD. http://www.ccd-sensor.de/html/3-chip_ccd.html, (letzter Aufruf 19.09.2009).

Sensor02. Alles über Kamera-Sensoren. http://www.henner.info/2mp.htm, (letzter Aufruf 19.09.2009).

Schulz T. Eine neue Dimension, Spiegel Online, 13.07.2009.

SDT. Easy Blend™, Automatic Digital Image Calibration, Technology and Applications. http://www.scalabledisplay.com/, 2006. (letzter Aufruf 27.05.2009).

Shannon CE. Communication in the Presence of Noise. Reprinted from Proceedings of the IRE, Vol. 37, no. 1, 01/1949, IEEE, 1998.

Striewisch T. Der große humboldt Fotolehrgang. 6.Auflage, humboldt Verlag, 2009. ISBN 978-3-89994-261-3.

Surati RJ. Scalable Self-Calibrating Display Technology for Seamless Large-Scale Displays. 24.01.1999.

Surati RJ, Knight Jr. TF. Super-Resolution Display, International Publication Number WO 00/07376, 10.02.2000.

Surman P, Sexton I, Hopf K, Lee WK, Bates R, IJsselsteijn W, Buckley E. Head Tracked Single and Multi-user Autostereoscopic Displays. IET, 2006.

ThingLab. 4Ddynamics – Mephisto 3D Scanning Engine. Produktblatt.

Thormählen T, Broszio H. Automatic line-based estimation of radial lens distortion. Integrated Computer-Aided Engineering, Vol.12 no.2, April 2005.

Tönnies KD, Lemke HU. 3D-Computer-grafische Darstellungen. R. Oldenbourg Verlag, 1994. ISBN 3-486-20790-3.

Transtec. Transtec 5000 SCSI/IDE RAID-Systeme. Produktblatt.

Tsai RY. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision. Proceedings International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986.

Ultra Thin Digital Booth Babe.
http://www.ubergizmo.com/15/archives/2009/07/ultra_thin_digital_booth_babe.html, 10.07.2009 (letzter Aufruf 08.04.2010).

Vioso. http://www.vioso.com/, (letzter Aufruf 17.02.2010).

Walree P, van. Vignetting. http://toothwalker.org/optics/vignetting.html, 2009. (letzter Aufruf 19.09.2009).

Webb SB, Jaynes CO, Image-Based Parametric Projector Calibration. Publication Number US 2007/0268306 A1, 22.11.2007.

Wooten J. Removing the IR Blocking Filter in the Nikon® 950 and 990, or How to Ruin Your New Camera. http://www.abe.msstate.edu/~jwooten/camera/lense.html, 25.09.2001(letzter Aufruf 05.03.2010).

WP. http://de.wikipedia.org/wiki/Wahrnehmungspsychologie. (letzter Aufruf 19.05.2010)

X-Rooms. IT Service OMIKRON GmbH, X-Rooms. Factsheet.

Yang R, Gotz D, Hensley J, Towles H, Brown MS. PixelFlex: A Reconfigurable Multi-Projector Display System. In: Proceedings IEEE Conference Visualization, IEEE Press, 2001: 68-75.

Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. Technical Report MSR-TR-98-71, 1999.

Zhang S. High-resolution, Real-time 3-D Shape Measurement. Dissertation, Stony Brook University, Mai 2005.

Zheng Y, Lin S, Kang SB. Single-Image Vignetting Correction. CVPR 2006: IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2006: 06.

Zheng Y, Yu J, Kang SB, Lin S, Kambhamettu C. Single-Image Vignetting Correction Using Radial Gradient Symmetry. CVPR 2008: IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008.

Zurawski K. Weichkäse mit Web-Anschluss. Bild der Wissenschaft, 2010: 1; 88-94.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1 Eyecatcher: spezielle Form einer Projektionsfläche (© Fraunhofer FIRST / Bernhard Schurian). 3
Abb. 1-2 Unkalibrierte 2-Kanal-Projektion. 3
Abb. 1-3 2-Kanal-Projektion nach Stitching/Warping. 4
Abb. 1-4 2-Kanal-Projektion nach Stitching/Warping und Blending. 4
Abb. 2-1 Kalibrier-Set-up aus (Raskar 2002). 10
Abb. 2-2 Autonomer Projektor aus (Raskar 2006). 12
Abb. 2-3 System nach Lee (2004); obere Reihe: Sensoransteuerung mit Kabelverbindung (links), drahtlose Sensoransteuerung (rechts); untere Reihe: unkalibrierte Projektion (links), kalibrierte Projektion (rechts). 13
Abb. 2-4 Kalibrierung eines Multi-Planar Displays nach Ashdown (2004). 14
Abb. 2-5 Geometrie- und Farbkorrektur nach Bimber (2005) (Content: „Der Schakal“, Universal Pictures). 17
Abb. 2-6 Markerlose Kalibrierung von 3D-Flächen nach Sajadi (2009) 18
Abb. 2-7 Fehlerhafte Projektion nach 3D Rekonstruktion für Multiprojektorsysteme. 21
Abb. 3-1 Systemaufbau. 26
Abb. 3-2 X-Rooms-Systemarchitektur aus Isaković (2002). 35
Abb. 3-3 Die Rendering Loop. 36
Abb. 3-4 Verfügbarer Stimulus – Projektionsfläche mit in Bezug auf die Kamera kalibrierter Projektion. 38
Abb. 3-5 Beachteter Stimulus – initial 39
Abb. 3-6 Beachteter Stimulus – bei Umfokussierung. 39
Abb. 3-7 Gestaltprinzipien 40
Abb. 3-8 Unkalibrierte Projektion aus Sicht der Kamera (Wandprojektion). 43
Abb. 3-9 Unkalibrierte Projektion aus Sicht des Betrachters (Wandprojektion). 44
Abb. 3-10 Bezüglich der Kamera kalibrierte Projektion aus Sicht der Kamera (Wandprojektion, gerade Kamera). 44
Abb. 3-11 Bezüglich der Kamera kalibrierte Projektion aus Sicht des Betrachters (Wandprojektion, gerade Kamera). 45
Abb. 3-12 Das lokale Referenzsystem ist gleich dem globalen Referenzsystem (Wandprojektion). 45
Abb. 3-13 Bezüglich der Kamera kalibrierte Projektion aus Sicht der Kamera (Wandprojektion, rotierte Kamera). 46
Abb. 3-14 Bezüglich der Kamera kalibrierte Projektion aus Sicht des Betrachters (Wandprojektion, rotierte Kamera). 47

Abb. 3-15 Das lokale Referenzsystem ist ungleich dem globalen Referenzsystem (Wandprojektion). 47
Abb. 3-16 Unkalibrierte Projektion aus Sicht der Kamera (Eckenprojektion). 48
Abb. 3-17 Unkalibrierte Projektion aus Sicht des Betrachters (Eckenprojektion). 49
Abb. 3-18 Bezüglich der Kamera kalibrierte Projektion aus Sicht der Kamera (Eckenprojektion). 49
Abb. 3-19 Bezüglich der Kamera kalibrierte Projektion aus Sicht des Betrachters (Eckenprojektion). 50
Abb. 3-20 Das lokale Referenzsystem ist ungleich dem globalen Referenzsystem (Eckenprojektion). 50
Abb. 3-21 Bezüglich der Geometrie kalibrierte Projektion aus Sicht der Kamera (Eckenprojektion). 51
Abb. 3-22 Bezüglich der Geometrie kalibrierte Projektion aus Sicht des Betrachters (Eckenprojektion). 52
Abb. 3-23 Das lokale Referenzsystem ist gleich dem globalen Referenzsystem (Eckenprojektion). 52
Abb. 4-1 Anforderungen an die Algorithmenentwicklung. 56
Abb. 4-2 Unkalibrierte Projektion....57
Abb. 4-3 Korrigierte Projektion. 58
Abb. 4-4 Komponenten des Algorithmus. 58
Abb. 4-5 Unkalibrierte Projektion....65
Abb. 4-6 Kalibrierte Projektion. 65
Abb. 4-7 Komponenten des Algorithmus. 66
Abb. 4-8 Unkalibrierte Projektion....72
Abb. 4-9 Kalibrierte Projektion. 72
Abb. 4-10 Komponenten des Algorithmus. 73
Abb. 4-11 Korrespondierende Randpunkte im untransformierten Bildraum. 77
Abb. 4-12 Korrespondierende Randpunkte im transformierten Bildraum. 77
Abb. 4-13 Ablauf der Klassifizierung. 82
Abb. 5-1 Unkalibrierte 4-Kanal-Projektion. 84
Abb. 5-2 Kalibrierte 4-Kanal-Projektion. 84
Abb. 5-3 2-Kanal-Projektion zur Erzeugung dreidimensionaler stereoskopischer Bilder. 85
Abb. 5-4 Monitorinstallation aus einer Perspektive ungleich der Kameraposition(Foto © Sandra Unger). 86
Abb. 5-5 Monitorinstallation aus Sicht der Kamera (Foto © Sandra Unger). 87
Abb. 5-6 Reale Bilderrahmen für virtuelle Gemälde aus Seales (2005). 88
Abb. 5-7 Virtuelle Gemälde aus Seales (2005). 88

Abb. 5-8 Unkalibrierte Zylinder- und Kulissenprojektion. Die Projektion erfolgt sowohl auf die Kulisse als auch auf die Projektionsfläche.....89
Abb. 5-9 Mit Hilfe der automatischen Kalibrierung, werden die Kulissen von der Projektion ausgeschlossen (3D-Szene © 2nd World, Canal+ Numedia).....90
Abb. 5-10 Einsatz der automatischen Kalibrierung beim Theaterstück ProjektX: Kombination einer gestackten 4-Kanal-Projektion mit echtem Schauspieler. 90
Abb. 5-11 Beispiel für eine CAVE Installation im Wohnbereich (© Fraunhofer FIRST). 91
Abb. 5-12 Einsatz einer immersiven Projektion zu Schulungszwecken (© Medizinische Fakultät der Universität Münster). 93
Abb. 7-1 Projektor 1, horizontale Kalibrierstreifen.....98
Abb. 7-2 Projektor 1, vertikale Kalibrierstreifen.....99
Abb. 7-3 Projektor 2, horizontale Kalibrierstreifen.....99
Abb. 7-4 Projektor 2, vertikale Kalibrierstreifen.....100
Abb. 7-5 Schwarzbild.....100
Abb. 7-6 Erzeugung vertikaler Kalibrierstreifen in mehreren Durchläufen (Beispiel). 102
Abb. 7-7 Durch die Kamera verursachte Effekte (vergrößerter Ausschnitt). 103
Abb. 7-8 Ränder und Zentrum eines Kalibrierstreifens (vergrößerter Ausschnitt). 104
Abb. 7-9 Absolute Subtraktion des Schwarzbildes (invertiert). 105
Abb. 7-10 Invertiertes Ergebnis der Subtraktion nach Graustufen-Transformation (vergrößerter Ausschnitt). 106
Abb. 7-11 Binarisiertes Streifenbild (vergrößerter Ausschnitt).....108
Abb. 7-12 Morphologische Operation Closing. 109
Abb. 7-13 Durch horizontale Versatzfilter erkannte Ränder (vergrößerter Ausschnitt). 111
Abb. 7-14 Kalibrierstreifen mit starkem Vignetting (vergrößerter Ausschnitt). 112
Abb. 7-15 Gradientenverlauf und Schwellenwertfilterung bei starkem Vignetting. 112
Abb. 7-16 Schnittpunkte der Ränder der Kalibrierstreifen (vergrößerter Ausschnitt). 113
Abb. 7-17 Schnittfläche der Kalibrierstreifen (vergrößerter Ausschnitt). 114
Abb. 7-18 Schnittpunktbestimmung mittels Gradienten. 115
Abb. 7-19 Homographie-Transformation und inverse Homographie-Transformation. 117
Abb. 7-20 Inverse Linsenverzerrung einer korrigierten Projektion. 118
Abb. 7-21 Beispiel einer Testtafel. 119
Abb. 7-22 Fotografierte Testtafel ohne Linsenverzerrung. 120
Abb. 7-23 Fotografierte Testtafel mit Linsenverzerrung. 120
Abb. 7-24 Bestimmung der Abweichung der Marker vom Ideal mit der Hess'schen Normalform. 122
Abb. 7-25 Optimierung der Verzerrungskoeffizienten mittels Greedy-Verfahren.....124
Abb. 7-26 Windowing: keinerlei Überlappung der Projektionsflächen. 125
Abb. 7-27 Mosaicking: leichte Überlappung der Projektionsflächen. 125

Abb. 7-28 Stacking: starke Überlappung der Projektionsflächen. 125
Abb. 7-29 Lokale vs. globale Optimierung. 126
Abb. 7-30 Einhüllende: größte umschließende Projektionsfläche. 127
Abb. 7-31 Vereinigung: größte vereinigte Projektionsfläche. 127
Abb. 7-32 Schnitt: größte gemeinsame Projektionsfläche. 127
Abb. 7-33 Gültige und ungültige Positionen für $Rect_{tmp.}$ 131
Abb. 7-34 Globale Optimierung der größtmöglichen Projektionsfläche. 132
Abb. 7-35 Unkalibriertes Testbild auf der Projektionsfläche und im Framebuffer. 132
Abb. 7-36 Kalibriertes Testbild auf der Projektionsfläche und im Framebuffer. 132
Abb. 7-37 Rezeptorenantwort. 136
Abb. 7-38 Modellierung der Rezeptorenantwort mit einem neuronalen Netz. 138
Abb. 7-39 Idealisierte Rezeptorenantwort. 138
Abb. 7-40 Antwortverhalten von linearer und Sinus-Blendfunktion. 139
Abb. 7-41 Blendfunktionen (Teilbilder 1.x), Ausgabe idealisierter Projektor (Teilbilder 2.x), Ausgabe realer Projektor (Teilbilder 3.x). 140
Abb. 7-42 Unbegradigte Überlappungsbereiche. 142
Abb. 7-43 Maximaler gemeinsamer Überlappungsbereich (grün) und überstehender Bereich (rot). 143
Abb. 7-44 Spalten und Zeilen der zu begradigenden Teilprojektionsbereiche. 143
Abb. 7-45 Begradigung eines Teilprojektionsbereiches (Spalte) mittels Scanline (Best-fit-Verfahren). 144
Abb. 7-46 Mit zur größtmöglichen Projektionsfläche nichtparallelen Geraden begradigte Überlappungsbereiche. 144
Abb. 7-47 Direkte Nachbarn in der Vierer-Nachbarschaft einer begradigten Teilprojektion. 147
Abb. 7-48 Blendbereiche einer begradigten Teilprojektion. 147
Abb. 7-49 Initialisierung der Argumente der Blendfunktion. 148
Abb. 7-50 Abstände eines Pixels im Blendbereich zum initialisierten Rand. 148
Abb. 7-51 Mehrkanalblending. 149
Abb. 7-52 Finales uv-Bild einer Teilprojektion. 149
Abb. 7-53 Finales Blendbild einer Teilprojektion. 150
Abb. 7-54 Zielbereich eines Teilwarps. 152
Abb. 7-55 Teilwarp mittels Texture Lookup: Transformation von Bildinhalten aus dem Texturraum in den Projektorraum. 152
Abb. 7-56 Projektor 1, horizontaler Referenzstreifen. 153
Abb. 7-57 Projektor 1, vertikaler Referenzstreifen. 154
Abb. 7-58 Projektor 1, horizontale Kalibrierstreifen. 154
Abb. 7-59 Projektor 1, vertikale Kalibrierstreifen. 155

Abb. 7-60 Projektor 2, horizontaler Referenzstreifen. 155
Abb. 7-61 Projektor 2, vertikaler Referenzstreifen. 156
Abb. 7-62 Projektor 2, horizontale Kalibrierstreifen. 156
Abb. 7-63 Projektor 2, vertikale Kalibrierstreifen. 157
Abb. 7-64 Schwarzbild. 157
Abb. 7-65 Weißbild. 158
Abb. 7-66 Schnittpunkte einer Teilprojektion. 160
Abb. 7-67 Anhand der vorhandenen Schnittpunkte unbestimmte Zielbereiche des uv-Texture-Look-ups. 160
Abb. 7-68 Extrapolation von Schnittpunkten. 161
Abb. 7-69 Projektor 1, horizontaler Referenzstreifen. 162
Abb. 7-70 Projektor 1, vertikaler Referenzstreifen. 162
Abb. 7-71 Projektor 1, horizontale Kalibrierstreifen. 163
Abb. 7-72 Projektor 1, vertikale Kalibrierstreifen. 163
Abb. 7-73 Projektor 2, horizontaler Referenzstreifen. 164
Abb. 7-74 Projektor 2, vertikaler Referenzstreifen. 164
Abb. 7-75 Projektor 2, horizontale Kalibrierstreifen. 165
Abb. 7-76 Projektor 2, vertikale Kalibrierstreifen. 165
Abb. 7-77 Schwarzbild. 166
Abb. 7-78 Weißbild. 166
Abb. 7-79 Falsche Lösungen der 3D-Rekonstruktion. 168
Abb. 7-80 Korrekte Lösungen der 3D-Rekonstruktion. 168
Abb. 7-81 Optimierung der initialen Vektoren. 170
Abb. 7-82 Initialisierungsschritt der 3D-Rekonstruktion 171
Abb. 7-83 Rekonstruiertes Drahtgittermodell. 171
Abb. 7-84 Schnittpunkte einer Teilprojektion. 174
Abb. 7-85 Nichtlineare Schnittpunktextrapolation. 175
Abb. 7-86 Position eines Schnittpunktes im 3D-Modell. 175
Abb. 7-87 Bestimmung der uv-Koordinate im rekonstruierten 3D-Modell. 177

Formelverzeichnis

Formel 7-1 Anzahl vertikaler Kalibrierstreifen im aktuellen Durchlauf. 101
Formel 7-2 Anzahl horizontaler Kalibrierstreifen im aktuellen Durchlauf. 101
Formel 7-3 Definition der ceil-Operation....101
Formel 7-4 x-Position des aktuellen Kalibrierstreifens im aktuellen Durchlauf....101
Formel 7-5 y-Position des aktuellen Kalibrierstreifens im aktuellen Durchlauf....101
Formel 7-6 Absolute Subtraktion des Schwarzbildes....104
Formel 7-7 Graustufen-Transformation....104
Formel 7-8 Histogramm eines Grauwertbildes. 106
Formel 7-9 Closing Operation....107
Formel 7-10 Dilation. 107
Formel 7-11 Erosion....108
Formel 7-12 Grauwert für die Faltungsoperation. 109
Formel 7-13 Wertebereich für die Faltungsoperation....110
Formel 7-14 Zweidimensionale, diskrete Faltungsoperation. 110
Formel 7-15 Filter-Kernel für horizontale Versatzfilter. 110
Formel 7-16 Filter-Kernel für vertikale Versatzfilter....110
Formel 7-17 Vereinfachte horizontale Versatzfilter. 110
Formel 7-18 Vereinfachte vertikale Versatzfilter. 110
Formel 7-19 Schnittpunktbestimmung der Ränder. 113
Formel 7-20 Schnittfläche der gefilterten Kalibrierstreifen. 115
Formel 7-21 Punktmengen unter, über, links bzw. rechts eines gefilterten Kalibrierstreifens. 115
Formel 7-22 Schnittpunkt einer Schnittfläche. 115
Formel 7-23 Matrix aller berechneten Schnittpunkte. 115
Formel 7-24 Homographie-Transformation mit homogenen 2D-Koordinaten. 116
Formel 7-25 Explizite Repräsentation von x' und y'. 116
Formel 7-26 Nullstellen nach Umformulierung. 116
Formel 7-27 Trennung in bekannte und unbekannte Parameter....117
Formel 7-28 Linear-homogenes Gleichungssystem mit Fehler. 117
Formel 7-29 Matrix aller fotografierten Marker. 121
Formel 7-30 Matrix aller normalisierten Zeilenvektoren. 121
Formel 7-31 Menge aller Vektoren vom Startpunkt einer Zeile zum aktuell betrachteten Marker dieser Zeile....121
Formel 7-32 Distanzberechnung mit der Hess'schen Normalform. 121
Formel 7-33 Menge aller Abweichungen von den Zeilen. 122

Formel 7-34 Summe aller Abweichungen vom Ideal. 122
Formel 7-35 Modell für radiale Verzerrung. 123
Formel 7-36 Bestimmung des Randes einer Projektionsfläche 128
Formel 7-37 Gemeinsamer Rand (Typ Schnitt). 129
Formel 7-38 Gemeinsamer Rand (Typ Vereinigung/Einhüllende). 129
Formel 7-39 Größte Projektionsfläche (Einhüllende). 129
Formel 7-40 Größte Projektionsfläche (Vereinigung/Schnitt). 129
Formel 7-41 Seitenverhältnis des größten Rechtecks. 130
Formel 7-42 Anpassung der größten Projektionsfläche (Vereinigung/Schnitt) an ein gewünschtes Seitenverhältnis. 130
Formel 7-43 Abbruchkriterium für die Rekursion. 131
Formel 7-44 Bestimmung der uv-Werte. 133
Formel 7-45 Matrix der uv-Werte der Schnittpunkte der Kalibrierstreifen. 133
Formel 7-46 Lineare Blendfunktion. 135
Formel 7-47 Gammakorrigierte lineare Blendfunktion. 135
Formel 7-48 Bestimmung der Rezeptorausgabe mit Hilfe eines neuronalen Netzes. 136
Formel 7-49 Sinus-Blendfunktion. 137
Formel 7-50 Gammakorrigierte Sinus-Blendfunktion. 137
Formel 7-51 Wichtung eines Randpixels. 145
Formel 7-52 Argument der Blendfunktion. 145
Formel 7-53 Eckpunkte des Zielbereichs eines Teilwarps. 151
Formel 7-54 Lineare Extrapolation von Schnittpunkten. 159
Formel 7-55 Abstand des Kamerafluchtpunktes zur Bildebene 167
Formel 7-56 Überprüfung der Orthogonalität eines Vektors zu einer durch zwei Vektoren definierten Ebene. 169
Formel 7-57 Rotationswinkel für die Schnittpunktextrapolation. 172
Formel 7-58 Definition eines Strahls. 173
Formel 7-59 Ein Punkt in einem Dreieck. 173
Formel 7-60 Schnitt zwischen Strahl und Dreieck (1). 173
Formel 7-61 Schnitt zwischen Strahl und Dreieck (2). 173
Formel 7-62 Schnitt zwischen Strahl und Dreieck (3). 173
Formel 7-63 Baryzentrischer Schnittpunkt von Strahl und Dreieck. 173
Formel 7-64 Bestimmung der u-Koordinate 176
Formel 7-65 Bestimmung der v-Koordinate 176