

Institut für Visualisierung und Interaktive Systeme
Universität Stuttgart
Universitätsstraße 38
70569 Stuttgart
Germany

Studienarbeit Nr.2456

**Photometrische Kalibrierung von großen,
hochauflösenden Displays**

**“Photometric calibration of large
high-resolution displays“**

Florian Frech, geb. Mack

Studiengang:	Diplom Informatk
Prüfer:	Prof. Dr. Thomas Ertl
Betreuer:	Dipl.-Inf. Christoph Müller
begonnen am:	10.04.2014
beendet am:	24.10.2014
CR-Klassifikation:	I.3.4

Kurzfassung

Aus den Projektionen mehreren Projektoren zusammengesetzte Darstellungen ermöglichen den Aufbau eines großen Displays. Der Eindruck als homogenes Display wird dabei von verschiedenen Faktoren geschmälert. Einer dieser Faktoren ist die Variation der Darstellung von Farben über der Displayfläche. Nahtlose Integration von Projektionen in das zusammengesetzte Display braucht deshalb die Korrektur dieser Variationen, sowohl innerhalb der einzelnen Projektionen wie auch über das gesamte zusammengesetzte Display.

Die Arbeit analysiert und implementiert ein bestehendes Verfahren zur Korrektur der Variation der Luminanz in Multi-Projektor-Systemen, also einem Teilproblem der Variation von Farben. Der Nachteil der Korrektur ist jedoch eine durchgehend dunklere Darstellung, da der dunkelste Bereich des zusammengesetzten Displays die Korrektur bestimmt. Neben der Implementierung dieses Verfahrens auf dem Multi-Projektor-System der Universität Stuttgart, wird deshalb ein modifiziertes Verfahren entwickelt und implementiert, welches Helligkeitsunterschiede lokal korrigiert und zulässt, dass verschiedenen räumlich entfernt liegende Bereiche des Displays unterschiedlich hell sind. Die Übergänge sollen jedoch so fließend gestaltet werden, dass ein homogener Eindruck bestehen bleibt. Die Implementierungen basieren allein auf einer digitalen Spiegelreflexkamera zur Messung des Displays. Zudem werden in der Arbeit die besondere Schwierigkeit der Gestaltung überlappender Projektionen und die Grenzen der Verfahren in diesem Problemfeld betrachtet.

Inhalt

1.	Einleitung.....	6
2.	Literatur	8
2.1.	Farbvariationen bei projizierter Darstellung	8
2.1.1.	Grundlegende Eigenschaften.....	9
2.1.2.	Ursachen	10
2.1.1.	Messung	12
2.2.	Farbräume	13
2.2.1.	CIE XYZ- und Yxy-Farbraum.....	13
2.2.2.	Yuv-Farbraum.....	16
2.3.	Luminance Attenuation Map (LAM).....	16
2.3.1.	Algorithmus	17
2.3.2.	Implementierung	20
2.3.3.	Resultate und Problemfelder	22
3.	Implementierung	24
3.1.	Vorüberlegungen	24
3.1.1.	Luminanz-Anpassung	24
3.1.2.	Linearisierung der Messergebnisse.....	28
3.1.1.	Kamera	29
3.1.2.	Verfälschende Faktoren	29
3.1.3.	Material und Standpunkt.....	32
3.1.4.	Repräsentation	35
3.1.1.	Geometrische Kalibrierung.....	36
3.1.2.	Linearisierung der Aufnahmen.....	38
3.1.3.	Addition überlappender Darstellungen	42
3.1.1.	Vorbehandlung überlagerter Bereiche.....	48
3.1.2.	Randbereich	51
3.1.3.	Korrelation der Projektoren.....	52
3.1.4.	Zielsetzung der Korrektur	54
3.2.	Praktische Implementierung	62
3.2.1.	I. Schritt, geometrische Kalibrierung.....	63

3.2.2.	II. Schritt, Luminanz-Surface	64
3.2.3.	III. Schritt, Generierung der LAMs	65
3.2.4.	IV. Schritt, Korrektur anzuzeigender Inhalte	68
3.2.5.	Komponenten der Implementierung	69
4.	Resultate.....	76
4.1.	Auswertung.....	76
4.1.1.	Ausgangssituation.....	77
4.1.2.	Vorbehandlung überlappender Bereiche.....	78
4.1.3.	Globale Optimierung.....	79
4.1.4.	Lokale Optimierung.....	81
4.1.5.	Lokal gewichtete Optimierung.....	84
4.1.6.	Kanten-Paradoxon.....	86
5.	Zusammenfassung und Ausblick.....	89
6.	References.....	92

1. Einleitung

Der Ansatz ein großes Display durch der Kombination mehrerer kleiner Displays zu erzeugen, findet sich nicht ohne Grund in verschiedensten Anwendungsbereichen. Zwei Eigenschaften sind dabei entscheidend: (1) Höhere Auflösung und (2) größere Dimensionierung des Displays [2]. Damit bietet sich die Technik überall dort an, wo diese Eigenschaften gefragt sind. [2] nennt einige Bereiche, in denen sie bereits verwendet wird, u.a. (1) Einsatzzentralen, sowohl militärische, wie zivile, (2) Automobildesign, (3) Geografische Analysen, (4) Visualisierungen in wissenschaftlichen Einrichtungen, (5) Bildung und Ausbildung, (6) und Tele-Immersion. Der Mehrwert des zusammengesetzten Displays ist mannigfaltig. In vielen Domänen wird die Möglichkeit genutzt, eine Vielzahl an Informationen simultan bereit zu stellen, andere Domänen nutzen die Visualisierung größerer Objekte in Echtgröße (bspw. Automobildesign) oder auch die übersichtliche Präsentation besonders umfangreicher und komplexer Inhalte, während zusammengesetzte Displays ebenso als visuelle Basis für Tele-Immersionen geografisch verteilter Kooperationen eingesetzt werden [2].

So unterschiedlich die Domänen, so unterschiedlich die Gestaltung der zusammengesetzten Displays. [2] identifiziert vier Grundtypen: (1) Multi-Monitor Desktops – eine im Heim- und

Bürobereich verbreitete, günstige Technik, (2) Cave-Systeme - der Anwender befindet sich von typischerweise vier größeren Displays umgeben und interagiert mit einer dreidimensionalen Welt, (3) Tiled LCD Panels – aus LCD-Bildschirmen zusammengesetzte Displays und (4) Multi-Projektor-Systeme – mehrere Projektoren, die jeweils in einen Bereich einer großen Leinwand projizieren. Während die unterschiedlichen Anlagen der ersten beiden Grundtypen offensichtlich sind, ist die Unterscheidung der beiden anderen Grundtypen diffiziler. Tatsächlich sind die Einsatzbereiche ähnlich, die Eigenschaften und Möglichkeiten differenzieren die Typen jedoch. Tiled LCD Panels sind im Vergleich günstig, platzsparend, unkompliziert auszurichten und ermöglichen eine einfache Farbkorrektur [2]. Multi-Projektor-Systeme basieren auf teureren Geräten mit hohen Wartungskosten (teure Projektor-Lampen mit vergleichsweise kurzer Lebenszeit), benötigen schon durch die nötige Distanz zwischen Projektoren und Leinwand mehr Platz und sind komplex in der Errichtung [2]. Trotzdem hat dieser vermeintlich komplizierte und teure Grundtyp einen Vorzug: Projektionen sind gegenstandslos und haben im Gegensatz zu LCD Panels keinen Rahmen. Somit lässt sich ein großes Display durch nahtlose Integration verschiedener Projektionen bilden. Allerdings ist die Integration ein komplexer Vorgang, [3] sieht die größten Herausforderungen dabei u.a. in (1) der exakten Ausrichtung der Projektoren, (2) dem Erreichen einheitlicher Chromatizität und Luminanz¹ und (3) die Gestaltung der Übergänge zwischen Projektionen. [2] sieht das Problem, der nahtlosen Integration noch nicht als gelöst an und erklärt dies zu einer der wichtigsten Herausforderungen der Forschung in diesem Bereich. Benutzer reagieren sensibel auf Abweichungen in Chromatizität und Luminanz. Der Eindruck einer großen, durchgehenden Darstellung geht so schnell verloren [2]. Nahtlose Integration baut zudem auf überblendeter Darstellung. Aneinanderliegende Projektionen werden ein Stück ineinander geschoben, die Bereiche durch virtuelle Grauverlaufsfilter überblendet [3]. Die menschliche Wahrnehmung reagiert auf Helligkeitsverläufe sensibel. Gelingt die Überblendung nicht durchgehend ohne Schwankungen in der resultierenden Luminanz, wird die homogene Wahrnehmung deshalb gestört, Artefakt der Schwankungen störend wahrgenommen [3]

Die Auswahl an Geräten für Multi-Projektor-Systeme ist breit. Neben vergleichsweise günstigen LCD- und DLP-Projektoren für den mobilen Einsatz [3], werden CRT-Projektoren mit flexibler geometrischer Kontrolle und besonders helle Lightvalve-Projektoren eingesetzt [2]. Nach [2] können selbst Projektoren vom selben Modell unterschiedliche Charakteristika von Luminanz und Chromatizität aufweisen. Nach [4] treten diese Abweichungen jedoch primär bei der Luminanz in Erscheinung, während die Chromatizität unter Projektoren desselben Modells weitestgehend homogen ist. Ungeachtet dieser konträren Einschätzung, sehen beide Quellen bei Farbvariationen relevante Verluste bei der Wahrnehmung der zusammengesetzten Darstellung als nahtloses Display. Ein Ansatz zur Auflösung der Luminanz-Abweichun-

¹ Klärung der Begriffe in 2.2.1

gen innerhalb einer Projektion und übergreifend innerhalb der zusammengesetzten Darstellung findet sich in [5, 6]. Dieser Ansatz baut auf generierte „Luminance Attenuation Maps“². Diese definieren eine Korrektur, abgeleitet von der Analyse der beobachteten Darstellung.

Das Multi-Projektor-System an dem Verfahren implementiert und evaluiert werden, besitzt fünf vertikal angeordnete Projektorfelder. Diese haben jeweils eine Auflösung von 2400x4096 Pixel. Jeweils 300 Pixel benachbarter Projektorfelder überlappen mit kleinen Unsicherheiten bezüglich der tatsächlichen Ausrichtung. Abbildung 12 verdeutlicht den Aufbau. Das zusammengesetzte System besitzt eine Auflösung von 10800x4096 Pixel. Nicht nur die überlappenden Bereiche fallen mit ihrer höheren Helligkeit auf. Auch Helligkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Projektorfeldern und sogar innerhalb der Felder selbst, stören die Wahrnehmung des Multi-Projektor-Systems als nahtloses Display. Ziel der Arbeit wird sein, ein Verfahren zur Korrektur dieser Unterschiede zu implementieren. Dabei soll neben der Homogenität des Displays der Einfluss der Korrektur auf die Dynamik der Darstellung beachtet werden und eine angepasste Korrektur entwickelt werden.

In 2 wird ein bestehendes Verfahren zur Helligkeits-Anpassung von Multi-Projektor-Systeme erläutert und dessen Grundlagen ausgeführt. In 3 wird dieses Verfahren implementiert und aufbauend Verfahren entwickelt, die diese Anpassung lokal begrenzen und die Dynamik des Systems besser ausnutzen. Die Resultate der Implementierungen werden in 4 ausgewertet und das Problemfeld überlappender Darstellungen genauer betrachtet. Zusammenfassung und mögliche Weiterentwicklungen der Implementierungen finden sich in 5.

2. Literatur

Die angestrebte Korrektur von Luminanz-Variationen innerhalb eines Multi-Projektor-Systems, fußt maßgeblich auf dem Verfahren aus [5, 6]. Das dort vorgestellte Verfahren wiederum basiert auf Beobachtungen, welche in [4] zusammengefasst sind. In 2.1 werden diese ausgeführt, das Verfahren selbst in 2.3. Um ein besseres Verständnis für das Prinzip der Korrektur zu schaffen, werden in 2.2 grundlegende Eigenschaften von Farben und Farbräumen, insbesondere der CIE XYZ- und Yxy-Räume, vorgestellt.

2.1. Farbvariationen bei projizierter Darstellung

Die Farbdarstellung bei Multi-Projektor-Systemen zeigt über die Fläche der Darstellung Variationen, die signifikant genug sind, um die Wahrnehmung als ein Display zu stören [4]. Nach [4] lassen sich die Ursachen in geräteabhängige Intra-Projektor Faktoren und aus dem

² Im Folgenden: LAM

Zusammenspiel verschiedener Projektor herrührender Inter-Projektor Faktoren unterscheiden. Bevor näher auf diese Faktoren und ihrer Auswirkungen eingegangen wird, wird das Grundlegende System analysiert, in dem [4] seine Resultate formuliert.

2.1.1. Grundlegende Eigenschaften

Majumder und Stevens verwenden in eine Definition von Farbe als (Y, x, y) , wobei $Y \hat{=}$ Luminanz (achromatisches Licht) und $x, y \hat{=}$ chromatische Koordinaten der Farbe repräsentieren. Die Kombination zweier Farben (Y_1, x_1, y_1) und (Y_2, x_2, y_2) lässt sich durch die Verhältnisse p_1, p_2 berechnen: $(Y_1 + Y_2, p_1x_1 + p_2x_2, p_1y_1 + p_2y_2)$. Hier soll darauf verwiesen werden, dass allein die Benennungen Y, x, y auf den CIE Yxy-Farbraum hindeutet (siehe 2.2.1). In [6] wird hingegen explizit zum YUV-Farbmodell gegriffen, allerdings mit einer nicht grundsätzlich richtigen bzw. reproduzierbaren Berechnung der Luminanz einer Farbe. Dieser Punkt wird in 2.2.2 erläutert.

Die Farben, die durch ausschließliche und volle Nutzung eine Farbkanals (Red, Green, Blue) dargestellt werden, bilden die Grundfarben [4]. Dies sind (Y_R, x_R, y_R) , (Y_G, x_G, y_G) und (Y_B, x_B, y_B) . Diese drei Koordinaten grenzen das Farb-Gamut ein [4], also den Bereich der darstellbaren Farben (siehe hierzu Abbildung 3 mit dem Farb-Gamut des XYZ-Farbraums). Wenn die Eigenschaften der Grundfarben bekannt sind und die folgenden vier Voraussetzungen gegeben sind, kann das Mischverhältnis der Kanäle für die Darstellung einer Farbe einfach bestimmt werden [4]:

- (1) unabhängige Kanäle – Das Licht eines einzelnen Kanals ist unabhängig von den beiden anderen Kanälen, wird nicht von deren Licht beeinträchtigt.
- (2) konstante Kanäle – Änderungen an der Intensität eines Kanals beeinflussen nur die Luminanz des Lichts, nicht jedoch dessen Chromatizität.
- (3) räumliche Homogenität - Das Display verhält sich bei gleichem Input an allen Pixeln gleich.
- (4) zeitliche Stabilität – Das Verhalten des Displays an allen Pixeln ändert sich nicht mit der Zeit.

Aus diesen Voraussetzungen, der Annahme, dass für einen Input $(0, 0, 0)$ vom Display keinerlei Licht ausgeht und dem Superpositionsprinzip elektromagnetischer Wellen [7] folgt, dass die an einen Pixel projizierte Farbe auf die Linearkombination der maximalen Werte der drei Kanäle zurückzuführen ist (mit jeweils Wert 0 der beiden anderen Kanäle) [4]. Somit gelten die linearkombinatorischen Eigenschaften $Y_C \equiv Y_R + Y_G + Y_B$, $x_c \equiv rx_R + gx_g + bx_b$ und $y_c \equiv ry_r + gy_g + by_b$ [4]. Die Luminanz entspricht also der Summe der Luminanzen der einzelnen Kanäle. Dasselbe gilt für die Chromatizität.

Theoretisch genügt es also, die Widergabe eines einzelnen Pixels für die drei Grundfarben zu erfassen um die Ausgabe jedes Pixels des Displays vorhersagen zu können. Jedoch entspricht ein Projektor nicht den geforderten Voraussetzungen [4].

2.1.2. Ursachen

Für heterogenes Erscheinungsbild von Luminanz und Chromatizität gibt es verschiedene Gründe. [4] identifiziert diese in zwei Kategorien: Inter-Projektor und Intra-Projektor. Eine zusätzliche Analyse wird dem Einfluss der Einstellmöglichkeiten von Projektoren und den Möglichkeiten zur objektiven Messung der Abweichungen gewidmet.

2.1.2.1. Material und Standpunkt (Inter-Projektor)

Material der Leinwand und Standpunkt des Betrachters sind im Grunde zwei verschiedene Felder, schneiden sich jedoch in einem Problem. Zum Material stellt [4] fest, dass bei der Rückprojektion eingesetzte Leinwände nicht dem Lambertschen Gesetz unterliegen, die registrierte Luminanz für den Betrachter also nicht „richtungskonstant“ ist. Zudem erkennt [4] das Problem, dass die Aufnahme mittels Kamera einen Standpunkt braucht. Mit dem Standpunkt sind die Abstände zu jedem Pixel auf der Leinwand gegeben und daraus ergibt sich eine standortabhängige Wahrnehmung. Die Intensität des Lichts nimmt mit dem Quadrat der Entfernung ab [8]. Unter Einbezug der realen Anwendung, also ein (zusammengesetztes) großes Display mit Breite und/oder Höhe, die größer sein können, wie der Betrachtungsabstand, wird die Bedeutung dieser Aussage bewusst. Unter diesem Aspekt sind Farbvariation aufgrund von Material und Standpunkt als inter-Projektor Effekt klassifizierbar. Die Unterschiede in Winkel und Abstände sind zwischen Punkten verschiedener Projektor-Flächen auf dem zusammengesetzten Display größer, als innerhalb einer Projektor-Fläche. Allerdings bestehen diese Effekte auch auf der Projektionsfläche eines Projektors, nur eben mit geringerer Ausprägung.

2.1.2.2. Umgebungslicht (Inter-Projektor)

Ein Projektor im Multi-Projektor-System strahlt auch auf die Fläche außerhalb der eigenen Display-Region. Deshalb schafft sich ein Multi-Projektor-System sein eigenes Umgebungslicht, das abhängig von den projizierten Bildern ist. Aus diesem Grund weisen Majumder und Stevens darauf hin, bei der Aufnahme der Ausgabe eines Projektors zu Messzwecken, umliegende Projektoren auszuschalten.

2.1.2.3. Intra-Projektor Effekte

In 2.1.1 angenommene Eigenschaften werden von den Projektoren bzw. ihren Projektionen auf der Leinwand nicht erfüllt. Schon die Voraussetzung, dass für einen Input $(0, 0, 0)$ vom Display keinerlei Licht ausgeht, wird nicht erfüllt. Zudem ist keiner der Kanäle konstant. Ein

Projektor-Input mit gegebener Chromatizität zeigt durch Änderung der Luminanz eine Darstellung mit veränderten Chromatizität. Dieser Effekt tritt bei Änderung einer schwachen Luminanz auf. Ab einer gewissen Helligkeit bleibt die Chromatizität konstant.

Somit ist nicht anzunehmen, dass die linearkombinatorischen Eigenschaften aus 2.1.1 ohne weiteres gelten. [4] führt jedoch weiter aus, dass durch die Beachtung eines Black-Offsets, die Eigenschaften doch gelten. Zu diesem Zweck wird die Luminanz bei Input (0, 0, 0) mit einem Bild erfasst und von allen weiteren Aufnahmen abgezogen.

Darüber hinaus wurden von Majumder und Stevens auf der Projektion einer monotonen Farbe relevante Luminanz-Schwankungen gemessen. Bei Frontprojektionen weißen Display-pixel an den Rändern eine um 50% geringere Luminanz als im Zentrum auf. Bei Rückprojektion hatten diese Randbereiche eine bis zu 80% geringere Luminanz. Die Variationen zeigten ein symmetrisches Bild. Dieses Ergebnis ist für das Multi-Projektor-System der Universität Stuttgart in 3.1.2 nachvollziehbar. Auf Basis dieser Ergebnisse wird deutlich, dass das Ziel eine monotone Fläche bei monotonem Input zu erhalten, bei nur einem Projektor mit einer nicht akzeptablen Verkleinerung des Dynamikumfangs einhergeht. Kein Pixel kann heller sein, als bei maximalen Input. Es muss also jeder hellere Pixel dunkler gemacht werden, so lange, bis alle Pixel bei maximalen Input die gleiche Luminanz erzielen. [4] weiß jedoch darauf hin, dass in Multi-Projektor-Systemen diese dunklen Randbereiche durch überlappende Projektorfelder aufgelöst werden. Somit kann eine höhere Dynamik erhalten werden. In [6] ignoriert die Korrektur zudem die äußeren Rändern des zusammengesetzten Displays. Auch das vermeidet einen übermäßigen Verlust an Dynamik in dargestellten Inhalten.

Im Gegensatz zur Luminanz eines Inputs, je nach Position des Pixels auf dem Display, verhält sich die Chromatizität jedoch stabil; ist also räumlich konstant und damit das Farb-Gamut ebenfalls stabil. Die Erklärung sehen Majumder und Stevens darin, dass die Luminanz-Abfälle von unterschiedlichen Entfernungen des Projektors zu den Display-Pixeln und der fehlenden Folge des Lambertischen Gesetzes herrühren. Diese Ursachen haben aber für die Chromatizität keinen (wahrnehmbaren) Einfluss. Zum Gamut finden sich in 2.2 Ausführungen.

Zudem attestiert [4] Projektoren zeitliche Instabilität. Also gerade das Gegenteil der vorausgesetzten zeitlichen Stabilität (siehe 2.1.1). Allerdings gilt dies nicht in relevanten Umfang für die Chromatizität. Es ist wieder die Luminanz einer Farbe, die von den Farbvariationen alternierender Lampen beeinflusst wird.

2.1.2.4. **Projektor-Einstellungen und Effekte**

Neben den bereits genannten intra- und inter-Projektor Effekten gibt es weitere Faktoren, die im Gegensatz zu den bisherigen, durch Einstellungen am Projektor und dessen Positionierung im Raum hervorgerufen, bzw. verstärkt werden.

Die Position des Projektors auf der Achse der Projektion, also die Distanz zum Display, hat keinen Einfluss auf die Chromatizität, verändert aber die Luminanz. Die Charakteristik der Luminanz bleibt jedoch bestehen, Die Luminanz wird mit größerer Distanz nur allgemein schwächer, da aus der größeren Projektionsfläche ein geringerer Anteil Licht pro Fläche x resultiert [4].

Neben der Variation der Distanz bei gleichbleibender Orientierung des Projektors, lässt sich dieser auch um X-, Y- und Z-Achse rotieren. Die Chromatizität bleibt wiederum konstant, die Variationen der Luminanz über das Display verlieren jedoch ihren symmetrischen Charakter (vergl. 2.1.2.3). [4] macht hierfür zwei Gründe aus: (1) Die Entfernungen der Displaypixels wird verzerrt und (2) erhält das zum Projektor verdrehte Display aufgrund des Cosinus-Effekts weniger Licht.

Weitere Einstellungen lassen sich am Projektor selbst verändern. [4] untersucht dabei die vier Variablen Zoom, Helligkeit, Kontrast und Weißabgleich:

Die Veränderung des Zooms brachte keine Veränderung von Chromatizität und Luminanz. Die Stabilität der Luminanz wird damit erklärt, dass die Gesamtfläche auf die Licht fällt konstant bleibt. Nur innerhalb dieser Grenze wird auf größere oder kleinere Flächen verteilt.

Mit Änderung der Helligkeit am Projektor verändert sich der Black-Offset. Außerdem wirkt diese Variable als Verstärkungsfaktor auf alle drei Kanäle in selber Höhe. Umso höher die Helligkeit, umso größer der Black-Offset und der Verstärkungsfaktor. Bei sehr geringer Einstellung werden dunklere im in größerem Ausmaß abgeschnitten (wie Schwarz dargestellt), bei sehr hoher hingegen verhält sich die Luminanz nicht mehr monoton. In Konsequenz rät [4] zur moderaten Einstellung dieser Variable.

Mit dem Kontrast verhält es sich ähnlich. Der Effekt einer Änderung der Einstellung verhält sich auf alle drei Kanäle ähnlich, bei sehr hohem Wert treten jedoch Differenzen in den Kanälen auf, was reines Grau in Richtung der Grundfarben verschiebt. In diesem Extrembereich verhält sich die Luminanz ebenfalls nicht mehr monoton.

Den Weißabgleich deutet [4] als Helligkeits- und Kontrast-Variation auf jeweils einen der Kanäle beschränkt. Deshalb wird das zuvor beobachtete Verhalten exklusiv auf einen Kanal umgedeutet.

2.1.1. Messung

Ziel der Messungen ist, die Bestimmung von Luminanz an den verschiedenen Punkten des zusammengesetzten Displays. Der nicht-Linearität der aufnehmenden Kamera wird von [4] durch Color Lookup-Tables entgegen gewirkt. Um Räumlichen Variationen (Vignettierung) im Kamerabild entgegenzuwirken, empfiehlt [4] Blenden kleiner $f/8$.

2.2. Farbräume

Majumder und Stevens [4] nennen die Herkunft nicht explizit, die Analogien der verwendeten Definition zum CIE Yxy-Farbraum ist jedoch offensichtlich. In [6] wird von den selben Autoren jedoch explizit der Yuv-Farbraum genutzt. Dieser Farbraum wird in 2.2.2 angerissen, es wird aber auch begründet, warum man sich auf CIE Yxy beschränken kann und welche Gefahr der Ansatz in [6] birgt.

Die meisten Geräte zur Bilderfassung benutzen einen Detektor, der auf drei Arten von Photorezeptoren basiert, je sensibel in einen Bereich des Lichtspektrums (roter, grüner und blauer Bereich; bzw. lang-, mittel- und kurzwellig) [9]. Jedes Spektrum kann somit mit drei Werten verlustfrei beschrieben werden [10].

Damit gewonnene Werte sind jedoch abhängig von den spezifischen Empfindlichkeitskurven der erfassenden Geräte. Der RGB-Farbraum ist deshalb geräteabhängig [9]. Die Erzeugung einer bestimmten Farbe lässt sich damit ebenfalls nur geräteabhängig erreichen, da die Beschreibung die Mischung definiert, jedoch nicht die Farbe [10]. Eine aus drei Grundfarben generierte Ausgabe führt zu einer Farbe, die vom erzeugten Spektrum bestimmt wird [10]. Es wird also die „Herstellung“ definiert, jedoch nicht das zu beobachtende Resultat. Um die Tristimulus – den Anteil dreier Grundfarben an einer spezifischen Farbe – allgemeingültig zu machen, braucht es eine allgemeingültige Wahrnehmung [10].

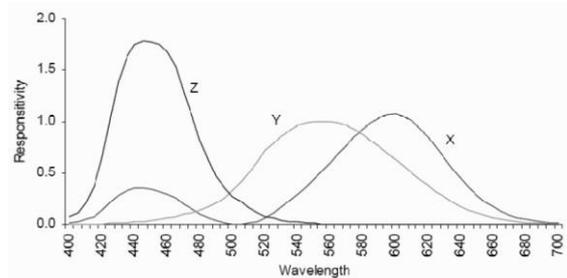


Abbildung 1 aus [1]

CIE genormte Empfindlichkeitskurven

2.2.1. CIE XYZ- und Yxy-Farbraum

Von der CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) wurden 1931 Empfindlichkeitskurven des Normalbeobachters bestimmt, womit die Tristimulus XYZ erzeugt werden können [10].

Aus umfangreichen Experimenten gewonnene Daten ermöglichten der CIE einen Normalbeobachter zu beschreiben. Dieser definiert einen Beobachter mit dem statistisch gewonnenen Standard entsprechenden Empfindlichkeitskurven [10]. Der CIE XYZ-Farbraum basiert auf diesem definierten Normalbeobachter. Die zugrunde liegenden Empfindlichkeitskurven wurden aus den empirisch gewonnenen Kurven transformiert [10], siehe Abbildung 1. Die Transformation wurde vorgenommen, da bei der Verwendung dreier real generierbaren Grundfarben, im daraus abgeleiteten Farbraum eine Grundfarbe positive, wie auch negative Werte annehmen muss [1]. Die Tristimulus X, Y und Z entsprechen darum keinem tatsächlich vorhan-

denen Reiz, wie bzw. beim beschriebenen RGB-Farbraum [9], jedoch ist das sichtbare Spektrum repräsentierbar ohne negative Werte. Eine Maßnahme, ergriffen um Fehlern in Berechnungen vorzubeugen [1]. CIE Farbräume - also CIE XYZ, wie auch CIE Yxy - besitzen nützlich Eigenschaften. Sie sind etwa unabhängig von Ausgabegeräten [9].

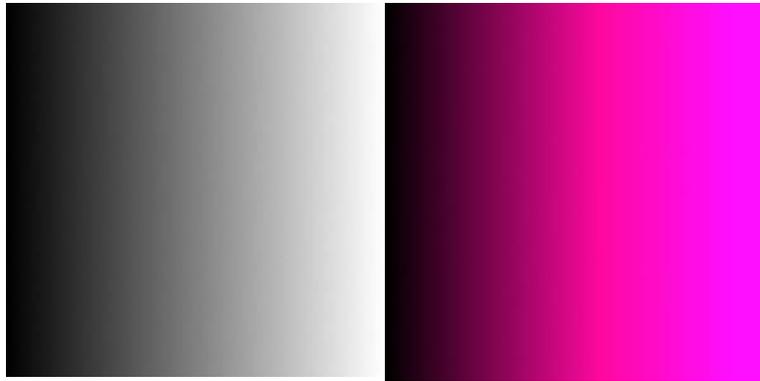


Abbildung 2

Farbverlauf vor (Links) und nach einer konstanten prozentualen Änderung des Y-Tristimulus (Rechts) im CIE-XYZ Farbraum.

so entworfen, dass sie der CIE Hellempfindlichkeitskurve entspricht [10], also der in [4], [6] und [5] angeführten Luminanz. Jedoch ist der XYZ-Farbraum noch nicht geeignet, Luminanz und Chromatizität separat zu betrachten. Der Wert Y nennt zwar die Luminanz, jedoch führt die Änderung ebenfalls zu einer Änderung der Chromatizität, siehe Abbildung 2.

Additiven Farbräumen können durchweg als Tristimulus-Farbräume bezeichnet werden, da sie auf der Beschreibung dreier Reize für den Beobachter basieren. Allerdings ist mit der Bezeichnung Tristimulus-Farbraum gemeinhin gerade dieser CIE XYZ-Farbraum gemeint [1]. Die Kurve Y (siehe Abbildung 1) bzw. die zugrunde liegende Funktion $Y(\lambda)$ wurde für diesen Farbraum

Farben haben zwei Aspekte: Chromatizität und Luminanz. Also einerseits das, was bzw. Rot von Blau unterscheidet und im Gemeingebrauch oft mit Farbe gleichgesetzt wird und andererseits das, was die Helligkeit des Lichts beschreibt [1]. Farbe wird über das Lichtspektrum bestimmt, also die Abbildung der Verteilung der Energie im Bereich der wahrnehmbaren Wellenlängen. Die Form dieser Abbildung beschreibt die Chromatizität, die vertikale Skalierung die Luminanz. Bei gleicher Form des Spektrums, jedoch einer größeren (proportionalen) vertikalen Skalierung, besitzt die Farbe dieselbe Chromatizität, jedoch eine größere Luminanz [1].

Für die Betrachtung von Transformationen wie in [5, 6] beschrieben, scheint ein Farbraum sinnvoll, der einerseits Chromatizität beschreibt und unabhängig davon Luminanz. Wie bereits angeführt entspricht der Tristimulus Y bereits der Luminanz einer Farbe. Im CIE Yxy-Farbraum wird dieses Y verwendet. Darüber hinaus definieren zwei Koordinaten (x und y) die Chromatizität. Diese Koordinaten werden ebenfalls aus dem CIE XYZ-Farbraum abgeleitet [1]:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

Eine dritte Koordinate z kann analog berechnet werden, ist jedoch intuitiv bereits gegeben, da offensichtlich gilt: $x + y + z = 1$. Ergebnis dieser Umwandlungen sind Koordinaten mit ausgeklammerter Luminanz [10]. x und y bestimmen somit für ein Spektrum einen Punkt unabhängig von der Energie [10]. Die CIE-Normfarbtafel zeigt diese Punkte, siehe Abbildung 3.

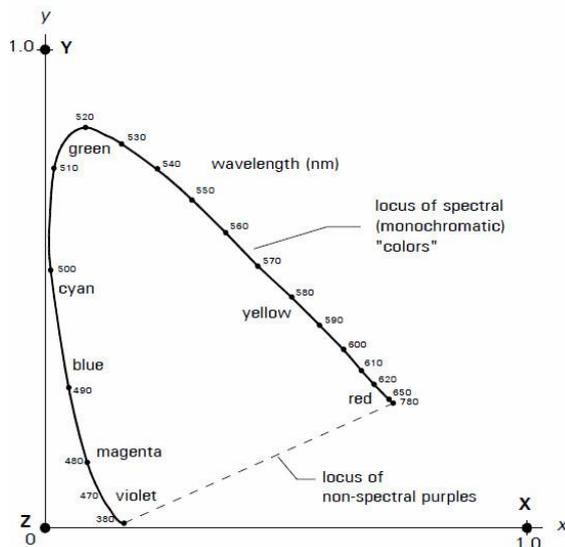


Abbildung 3 aus [1]

CIE-Normfarbtafel mit Lage der (nicht real darstellbaren) Grundfarben des CIE XYZ-Farbraums

Ein Farbraum basierend auf drei real darstellbaren Grundfarben liegt innerhalb der Spektrallinie. Somit ist auch ersichtlich, wieso die CIE-Tristimulus X, Y und Z nicht real darstellbar sind: Kein Dreieck mit allen Ecken innerhalb oder auf der Spektrallinie kann die gesamte wahrnehmbare Chromatizität einschließen; Dem CIE XYZ-Farbraum gelingt dies jedoch. Die von einem additiven Farbraum (ohne negative Werte) repräsentierbare Chromatizität liegt im Dreieck der Chromatizitäten der Grundfarben und wird Gamut genannt [1]. Da die von der Chromatizität isolierte Änderung der Luminanz im CIE XYZ-Farbraum durch die alleinige Änderung des Y-Tristimulus nicht zu erreichen ist, ist die Transformation eines Farbraums in den CIE Yxy-Farbraum wünschenswert.

Der Weg von einem (geräteabhängigen) auf dreier real zu erreichenden kurz-, mittel- und langwelliger Grundfarben basierenden Farbraums in CIE Yxy führt über die Überführung in CIE XYZ und anschließender Transformation in CIE Yxy.

Zunächst werden die drei Grundfarben des Ausgangssystems gemessen und den entsprechenden Farben im CIE XYZ-Farbraum zugeordnet. Die aus diesen drei Wertepaaren ableitbare lineare Transformation überführt jede Farbe im Ausgangsraum in den Zielraum [10]. Formal ist dies die Multiplikation der Repräsentation im Ausgangsraum mit einer 3x3-Matrix [10]:

$$\begin{bmatrix} R & G & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_R & Y_R & Z_R \\ X_G & Y_G & Z_G \\ X_B & Y_B & Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}$$

bzw.:

$$\begin{matrix} X_R & X_G & X_B & R & X \\ [Y_R & Y_G & Y_B] [G] = [Y] \\ Z_R & Z_G & Z_B & B & Z \end{matrix}$$

Einige Matrizen in der zweiten Form für geläufige Farbräume (Links), jeweils mit Rücktransformation im Klammern (Rechts) [11]:

Adobe	0,5767309	0,1855540	0,1881852	2,0413690	-0,564946	-0,344694
RGB(D65):	[0,2973769	0,6273491	0,0752714]	[-0,969266	1,8760108	0,0415560]
	0,0270343	0,0706872	0,9911085	0,0134474	-0,118390	1,0154096
sRGB(D65):	0,4124564	0,3575761	0,1804375	3,2404542	-1,537138	-0,498531
	[0,2126729	0,7151522	0,0721750]	[-0,962660	1,8760109	0,0415560]
	0,0193339	0,1191920	0,9503041	0,0556434	-0,204026	1,0572252

Die zweite Zeile der Transformationen zeigt bereits die Berechnung der Luminanz:

$$L = R * Y_R + G * Y_G + B * Y_B$$

Nicht zu übersehen ist der übergroße Einfluss des mittelwelligen Anteils und der praktisch zu vernachlässigende Anteil des kurzwelligen Anteils im Spektrum.

2.2.2. Yuv-Farbraum

Die Verwendung eines Yuv-Farbraums findet sich in [6]. Allerdings wird nicht klar, was damit tatsächlich gemeint ist. Die erste Möglichkeit ist CIE YUV. Dies ist ein durch lineare Transformation von CIE Yxy geschaffenes Modell [12]. Damit gelten grundsätzlich die Ausführungen zu CIE Yxy bzw. XYZ in 2.2.1. Der Wert Y ist sogar in allen drei Modellen für die gleiche Farbe gleich. Dass [6] jedoch $Y = 0,299R + 0,587G + 0,114B$ zur Berechnung der Luminanz angibt und dies als die gebräuchliche Transformation bezeichnet, spricht für die zweite Möglichkeit: Für die Übertragung von analogen Fernsehsignalen gibt es ein YUV Modell. Dieses, aus der Notwendigkeit ein zum Schwarzweiß-Fernsehen kompatibles Modell für Farbfernsehen, zu definieren, gibt ebenfalls die Luminanz (Y) unabhängig von der Chromatizität (U, V) an. Die Luminanz Y wird dabei mit der genannten Formel berechnet. Allerdings ist dieses Modell geräteabhängig [12]. Das wird insbesondere beim Versuch wiederholbare Resultate zu schaffen zum Problem. Mit der genannten Formel kommt man mit der gleichen Farbe zu anderer Luminanz, beschreibt man sie bspw. statt in Adobe RGB in sRGB. Der Wiederholbarkeit wegen müsste man die Luminanz mit $Y_{Adobe\ RGB}$ oder Y_{sRGB} angeben. Augenscheinlich ist die Wahl eines geräteunabhängigen Modells hier zu bevorzugen.

2.3. Luminance Attenuation Map (LAM)

Ansätze den Inter-Projektor- und Intra-Projektor- Faktoren hinter heterogenen Displays entgegenzuwirken, finden sich in Softwarelösungen und in optischen Systemen. Diese behandeln aber entweder nur Inter-Projektor oder nur Intra-Projektor Faktoren [4]. Das Verfahren in [5,

[6] hingegen hat den Anspruch beide Faktoren mit einem Verfahren zu behandeln. Da das Verfahren in [6] ausführlicher beschrieben ist. Wird diese Quelle im Folgenden exklusiv genannt.

2.3.1. **Algorithmus**

Majumder und Stevens beschreiben in [6] einen Algorithmus, der aus zwei Teilen besteht. Im ersten Teil, der Kalibrierung - werden für jeden Kanal Luminanz-Absenkungs-Karten (LAMs) generiert, welche im zweiten Teil verwendet werden, um anzuzeigende Bilder zu korrigieren. Der Algorithmus wird von den Autoren als der erste Versuch bezeichnet, sowohl Inter- als auch Intra-Projektor Effekt mit einer Lösung zu korrigieren. Darüber hinaus basierten Lösungsversuche von Inter- oder Inter-Projektor Effekte zuvor auf dem Einsatz hochpräziser und kostenintensiven Radiometern, während ihre Lösung mit einer vergleichsweise günstigen Digitalkamera auskommt. Die Aufnahme mittels dieser Digitalkamera macht das Verfahren einfacher, skalierbar und praktischer.

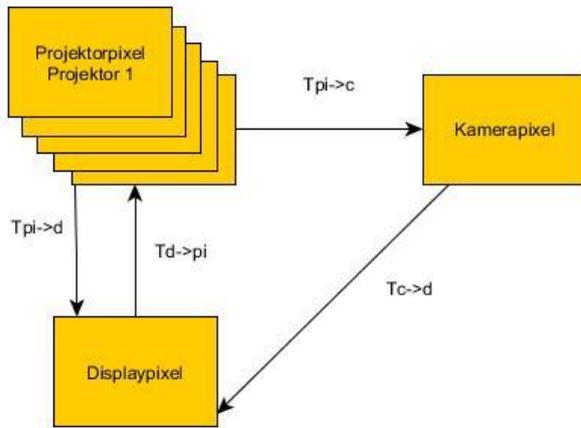
2.3.1.1. **Algorithmus, erster Teil: Kalibrierung**

Der erste Teil baut auf drei Schritte. (1) Messung der Luminanz Wiedergabe, (2) Bestimmung des allgemein erreichbaren Wiedergabe und schließlich (3) der Erzeugung der LAMs [6].

2.3.1.1.1. **Erster Schritt, Messung der Luminanz Wiedergabe**

Für den ersten Schritt nehmen Majumder und Stevens an, die Wiedergabe des Projektors wäre linear, also die Wiedergabe von Schwarz sei „Null“, die maximale Luminanz für den maximalen Input gemessen wird und die Wiedergaben für alle Eingaben dazwischen durch lineare Interpolation dieser beiden Wiedergaben gefolgert werden kann [6]. Hier zeigen sich das gleiche Problem auf zwei Feldern: Nichtlineare Beziehungen zwischen Eingabe der Projektoren und deren Wiedergabe und nichtlineare Beziehungen zwischen der Eingabe einer erfassenden Kamera und deren Ausgabe. Für den in [6] vorgestellten Algorithmus ist die Annahme der Linearität jedoch aus drei Punkten grundlegend: (1) Es genügt die Wiedergabe des maximalen Eingangs zu erfassen (anstatt jeden Eingang zwischen Schwarz und maximalen Eingangs), (2) die allgemein erreichbare Luminanz lässt sich als die lineare Wiedergabe mit kleinstem Luminanz-Umfang definieren und (3) die Luminanz-Absenkung ist eine einfache Skalierung, die in LAMs kodiert werden kann [6]. Um der Annahme linearen Verhaltens gerecht zu werden wird ein Algorithmus aus [13] verwendet, um die Ausgabe der Kamera zu linearisierten - siehe hierzu 3.1.2.

Der Anfang des ersten Schritts ist also die Luminanz $L_d(x_d, y_d)$ jedes Pixels (x_d, y_d) des Displays zu finden. Ist dies geschafft, muss der Zusammenhang aller Pixel (x_d, y_d) zu den Pixeln der Projektoren (x_{p_i}, y_{p_i}) hergestellt werden. Hierfür werden zwei Überführungen benötigt:



$$T_{P_i \rightarrow C}(x_{p_i}, y_{p_i})$$

zur Zuordnung eines Pixels (x_{p_i}, y_{p_i}) von Projektor i zu einem Kamerapixel (x_c, y_c) und

$$T_{C \rightarrow D}(x_c, y_c)$$

um einen Kamerapixel einem Displaypixel (x_i, y_i) zuzordnen. Die Konkatenation der

beiden Überführungen definiert

Abbildung 4

$$T_{P_i \rightarrow D}(x_{p_i}, y_{p_i})$$

Geometrische Räume der Implementierung und ihre Transformationen.

, also die Überführung eines Projektorpixels (x_{p_i}, y_{p_i}) zu einem Displaypixel (x_i, y_i) . Die inverse Funktion

$$T_{D \rightarrow P_i}(x_d, y_d)$$

wird ebenfalls verwendet.

Damit sind die geometrischen Beziehungen abgedeckt, um alle $L_d(x_d, y_d)$ aus den Kameraaufnahmen zu extrahieren [6]. Abbildung 4 skizziert die vier Überführungen.

Zur Datenerfassung wird pro Projektor je eine Aufnahme bei maximalen Inputs eines Kanals (und die beiden anderen Kanäle mit minimalen Input) benötigt. Majumder und Stevens kommen allerdings selbst zum Schluss, dass die Aufnahme aller drei Kanäle keine signifikante Verbesserung der Korrektur bringt, weshalb auch nur der grüne Kanal erfasst werden kann [6]. Im Folgenden werden Formeln so notiert, als ob es nur ein Kanal erfasst wird. Zumindest überlappende Projektoren sind jeweils aus. Die Kamera ist in fixer Position. Aus den Aufnahmen werden die Luminanz-Bilder der einzelnen Projektoren abgeleitet, wobei I_i das Luminanz-Bild von Projektor i ist.

Aus I_i wird Luminanz-Surface $L_{P_i}(x_{p_i}, y_{p_i})$ für jeden Projektor P_i generiert. Hierzu wird jeder Pixel (x_{p_i}, y_{p_i}) mit der bekannten Funktion $T_{p_i \rightarrow C}$ in die korrespondierende Kamerakoordinate überführt und der entsprechende Wert des Pixels in I_i ermittelt, also:

$$L_{p_i}(x_{p_i}, y_{p_i}) = I_i(T_{P_i \rightarrow C}(x_{p_i}, y_{p_i}))$$

Sind alle L_{P_i} erzeugt, kann das Luminanz-Surface des gesamten Displays L_d zusammengesetzt werden. Mittels $T_{D \rightarrow P_i}(x_d, y_d)$ wird der Einfluss jedes Projektors auf den Displaypixel (x_d, y_d) überprüft und addiert. Das zusammengesetzte Luminanz-Surface ist somit über

$$L_d(x_d, y_d) = \sum_{i=1}^n L_{P_i}(T_{D \rightarrow P_i}(x_d, y_d))$$

definiert, wobei die Projektoren mit P_1, P_2, \dots, P_n bezeichnet sind. An dieser Stelle stellt sich die berechnete Frage, warum das Luminanz-Surface des Displays rekonstruiert werden muss. Es könnte mit einer weiteren Aufnahme erfasst werden, es müssten nur alle Projektoren exklusiv den entsprechenden Kanal bei maximalen Input anzeigen. Mit den angegebenen Formeln lässt sich das gesuchte Luminanz-Surface auf dieser Basis einfacher finden. Den Grund nennt [6] nicht explizit, eigene Überlegungen legen das Zusammensetzen aber nahe und zeigen das komplexe Problem, welches mit der Generierung aus einem Bild heraus einher geht – siehe hierzu 4.1.6.

2.3.1.1.2. Zweiter Schritt, Allgemein erreichbare Wiedergabe

Die allgemein erreichbare Wiedergabe definiert [6] als die minimale Luminanz im Luminanz-Surface L_d , es gilt also:

$$\exists (x_{min}, y_{min}) \in L_d \forall (x_d, y_d) \in L_d: (x_d, y_d) \geq (x_{min}, y_{min})$$

Die so ermittelte Luminanz wird mit L_{min} bezeichnet.

[6] schränkt dies in der Implementierung ein. Hier wird ein definierter Rand des Displays ignoriert und nicht korrigiert. Damit fallen die Punkte aus der Ermittlung der allgemein erreichbaren Wiedergabe heraus. Es bleibt also:

$$\exists (x_{min}, y_{min}) \in L_d' \forall (x_d, y_d) \in L_d': (x_d, y_d) \geq (x_{min}, y_{min})$$

2.3.1.1.3. Dritter Schritt, LAM

Die LAM des Displays wird mit A_d notiert. Die Pixel der LAM A_d werden mittels

$$A_d(x_d, y_d) = \frac{L_{min}}{L_d(x_d, y_d)}$$

bestimmt. Durch die getroffene Definition fallen diese Werte zwischen 0 und 1. Mittels der Überführung $T_{P_i \rightarrow D}$ werden schlussendlich die LAMs der Projektoren erzeugt:

$$A_{P_i}(x_{P_i}, y_{P_i}) = A_d(T_{P_i \rightarrow D}(x_{P_i}, y_{P_i}))$$

2.3.1.2. Algorithmus - Zweiter Teil: Bildkorrektur

Die bekannte Überführung $T_{P_i \rightarrow D}$ kann verwendet werden, um gemeinsam darzustellende Inhalte auf die beteiligten Projektoren zu verteilen. M bezeichnet das gesamte Bild, M_{P_i} das Teilbild für Projektor i .

$$M_{P_i}(x_{P_i}, y_{P_i}) = M(T_{P_i \rightarrow D}(x_{P_i}, y_{P_i}))$$

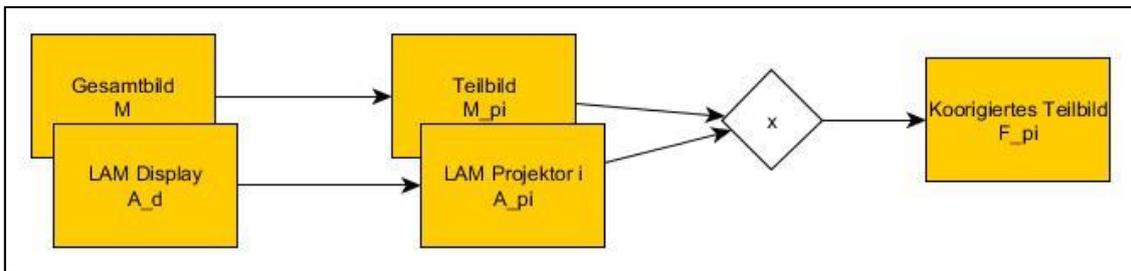


Abbildung 5

Weg der Zwischenprodukte in verschiedenen Räumen zu den korrigierten Teilbildern

Um die im ersten Teil erarbeiteten LAMs auf die Teilbilder M_{P_i} anzuwenden, werden Teilbild und korrespondierende LAM komponentenweise multipliziert. Das korrigierte Teilbild M_{P_i} wird mit F_{P_i} bezeichnet:

$$F_{P_i}(x_{P_i}, y_{P_i}) = M_{P_i}(x_{P_i}, y_{P_i}) \times A_{P_i}(x_{P_i}, y_{P_i})$$

Abbildung 5 zeigt den Weg vom nicht korrigierten Gesamtbild zum korrigierten Teilbild mit den beteiligten Objekten.

2.3.2. Implementierung

Majumder und Stevens beschreiben in [6] ihre praktische Umsetzung des Algorithmus. Die dabei verwendeten Multi-Projektor-Systeme waren (1) ein 2x2 Aufbau mit 1200x800 Pixel Gesamtauflösung und (2) ein 5x3 Aufbau mit 4500x2000 Pixel Gesamtauflösung. Bei der verwendeten Kamera handelte es sich um eine Fujifilm MX-2900 Zoom. Eine Digitalkamera mit Auflösung von 1800 x 1200 Pixel, einer Sensorfläche von 7,6 x 5,7mm und einem fest installierten Zoomobjektiv mit 35 – 105mm, Die Blende lässt sich im Weitwinkelbereich zwischen f/3,3 und f/7,6, sowie zwischen f/5 und f/11 im Telebereich verstellen.

Majumder und Stevens berechnen die Luminanz der einzelnen Bildpunkte aus den drei Kanälen mittels $Y(R, G, B) = 0.299R + 0.457G + 0.144B$. Dass diese Funktion nicht ohne Kritik angewandt werden kann, wird in 2.2.2 diskutiert.

Hat man die Luminanz-Surfaces aller Projektoren, werden diese im Koordinaten-Raum des Displays zusammen addiert. Für jeden Pixel eines der Surfaces der Projektoren wird mittels $T_{P_i \rightarrow D}$ der korrespondierende Pixel im Surface bestimmt und die Luminanz auf diesen Punkt addiert. [6] addiert allerdings nicht auf einen Pixel, sondern addiert den jeweiligen Beitrag auf die vier naheliegendsten Pixel. Das macht vor allem dann Sinn, wenn die Abbildung $T_{P_i \rightarrow D}$ nicht stets exakt auf einen Pixel abbildet. Dadurch, dass stets addiert wird, werden überlappende Bereiche automatisch erzeugt. Unter der Annahme, dass linearisierte Messergebnisse vorliegen und dass dort wo zwei Projektoren überlagern, die auf dem Display wahrgenommene Luminanz der Summe der beteiligten Projektoren entspricht, lässt sich das Luminanz-Surface auf diese Weise rekonstruieren.

Die Generierung der LAMs weicht in [6] in zwei Punkten vom theoretisch formulierten Algorithmus ab. Der erste Punkt ist, dass mit Ausnahme der überlappenden Bereiche der äußere Rand des zusammengesetzten Displays in diesem Prozess ignoriert wird. Hier liegen möglicherweise besonders dunkle Stellen der Projektion, welche die Korrektur im übrigen Bereich zu groß werden lässt. Der zweite Punkt ist die Vorbehandlung überlappender Bereiche. Dies wird in 2.3.2.1 ausgeführt. Nach der Generierung der LAMs müssen diese mit der Vorbehandlung zusammengefügt werden. Dies geschieht durch komponentenweise Multiplikation. Die Vorbehandlung ist nichts anderes, wie eine weitere LAM.

2.3.2.1. Überlappende Bereiche

Die Bereiche überlappender Projektoren stellen ein besonderes Problem dar. Diese Bereiche werden bewusst eingerichtet, um eine möglicherweise gar nicht erreichbare Präzision in der Ausrichtung der Projektoren im System zu umgehen [6]. Allerdings sind überlappenden Bereiche deutlich heller als anliegende Bereiche, während dazwischen eine „scharfe“ Kante liegt, also kein fließender Übergang vorhanden ist. Die Korrektur verlangt deshalb eine Präzision, die der vorgestellte Algorithmus nicht liefert, zumindest nicht mit der verwendeten Kamera und den verwendeten Projektoren. Die Auflösung der Kamera erlaubt dies nicht. Tests von Majumder und Stevens zeigten, dass teilweise 20 Prozent der Auflösung des gesamten Displays ausreichen, um immer noch korrekte LAMs zu generieren, wenn überlappende Bereiche vorbehandelt wurden [6]. Die Vorbehandlung geschieht durch fließendes ausblenden, bzw. einblenden überlappender Bereiche der Projektoren. [6] gestaltet diese Bereiche durch eine lineare Funktion, gibt aber an, dass auch andere Funktionen, etwa Kosinus-Funktionen dem Zweck dienen, solange die Überlappung nicht breiter als der überlappende Bereich ist. Bedenkt man, dass auf dem Display keine lineare Wiedergabe des Inputs erzeugt wird, scheinen nicht-lineare Funktionen dieses Problem potenziell besser zu lösen.

Wenn die überlappenden Bereiche aufgrund fehlender Präzision implementiert werden, ist nicht davon auszugehen, dass die Überlappung diese Präzision plötzlich aufweist. Die Gestaltung der Übergänge muss also sanft genug sein, um ein bis zwei Pixel Toleranz zu erlauben [6], auch bei der Korrektur durch LAMs. Die Übergänge werden vor Start des gesamten Algorithmus behandelt, der Algorithmus „sieht“ also bereits das behandelte Bild.

2.3.3. Resultate und Problemfelder

In Abbildung 6 ist das Resultat der Implementierung auf dem 2x2 System zusehen. Links ist jeweils die Situation ohne Korrektur und rechts mit Korrektur abgebildet. [6] gibt selbst an, dass monotone Fläche die problematischsten Motive darstellen. Die Motive aus Abbildung 6 fallen nicht in diese Kategorie. Auffällig ist allerdings, wie dunkel die Darstellung durch die Korrektur wird. Ein wichtiger Punkt weiterer Untersuchungen wird deshalb sein, eine für den Betrachter ausgewogen erscheinende Korrektur zu finden ohne das gesamte Display in diesem Maße abzdunkeln. Die in Abbildung 6 zu sehenden schwarzen Ränder könnten der in 2.3.2 erwähnte Rand sein, den [6] bei der LAM-Generierung ignoriert. Andernfalls müsste dieser Bereich im korrigierten Motiv sichtbar sein. Deshalb ist wahrscheinlich, dass die schwarzen Ränder Teil des Displays des Multi-Projektor-Systems sind und explizit mit minimalem Projektor-Input belegt wurden. Im Verlauf der Implementierung wurden von Majumder und Stevens mehrere Problemfelder entdeckt, die im Folgenden zusammengefasst werden.

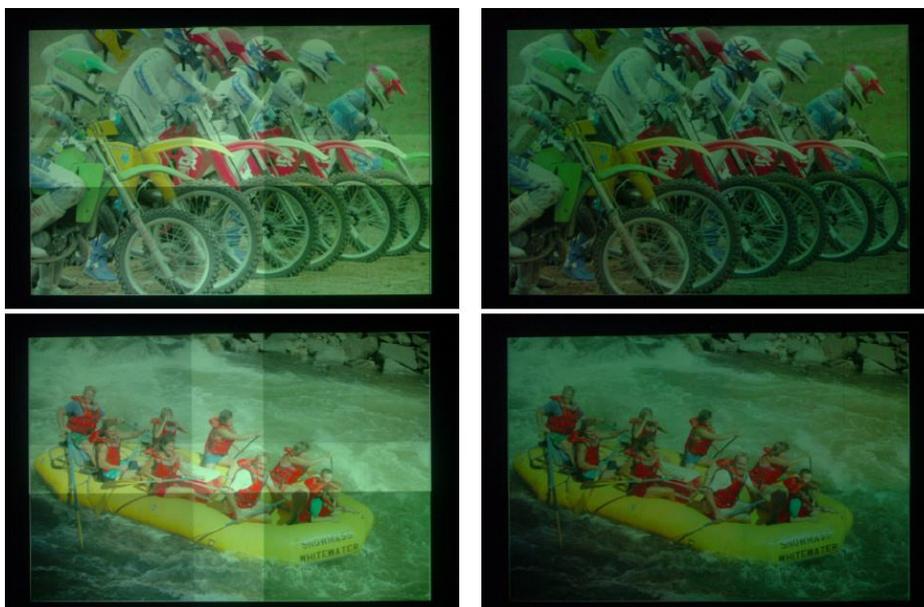


Abbildung 6 – aus [1]

Ausgangssituation (Links) und Situation nach Durchführung der Korrekturen per LAMs (Rechts)

2.3.3.1. Genauigkeit der geometrischen Kalibrierung

Schon kleine Abweichungen führen im Bereich der Kanten zu relevanten Fehlern in den erstellten LAMs – es gelingt also kein ausgewogenes Bild mehr. Obwohl dem verwendeten Verfahren zur geometrischen Kalibrierung eine Genauigkeit von 0,2 Displaypixel attestiert wird, bleiben diese Bereiche kritisch. Mit der in 2.3.2.1 beschriebenen Vorbehandlung überlappender Bereiche, wird laut [6] eine Toleranz von fünf bis sechs Displaypixel erreicht.

2.3.3.2. Auflösung der Aufnahmen

Von der Auflösung der Aufnahmen hängt die Genauigkeit der Rekonstruktion ab. Mit der doppelten Auflösung des gesamten Displays, hätte man keine Artefakte mehr. Allerdings zeigten Versuche, dass mit bis zu 1/5 der Display-Auflösung immer noch passende Luminanz-Surfaces gefunden wurden, in einigen Fällen aber noch bei 1/3 Auflösung Artefakte erzeugt wurden.

2.3.3.3. Dynamik des Displays

Da auf dem Display des Multi-Projektor-Systems bei maximalen Input eines Kanals deutliche Helligkeitsunterschiede ausgemacht werden können, insbesondere dann, wenn die Projektoren an sich schon unterschiedlich hell sind, sieht [6] das Problem, dass die Dynamik des Displays nicht mehr verlustfrei von der Kamera erfasst werden kann. Für diesen Fall empfiehlt [6] unterschiedlich helle Displays mit individueller Belichtungszeit aufzunehmen (bei Statik weiterer Parameter) und diesen Faktor beim Zusammensetzen zum Luminanz-Surface des Displays zu berücksichtigen.

Hier will allerdings erwähnt sein, dass die verwendete Kamera aus der Anfangszeit digitaler Fotografie stammt und mit dem CCS-Sensor bei weitem nicht die Dynamik neuerer Vollformat-Spiegelreflexkameras erreicht. Somit ist dieses Problem bei überlegter Wahl der Belichtung so nicht mehr existent.

2.3.3.4. Eigenschaften der Kamera

Die Kamera soll eine monotone Szene (also konstante Luminanz und Chromatizität) auch als monotones Bild abbilden (dabei sind alle Punkte der Szene auch in ähnlichem Abstand zur Kamera positioniert). [6] übernimmt hierzu eine Aussage aus [14], dass dies von den meisten Kameras mit Blenden kleiner $f/8$ erreicht wird. Im Kontext ist die Aussage richtig, allerdings ist die abgeleitete Empfehlung, auf Blenden kleiner $f/8$ zurück zu greifen, diskussionswürdig. Die These wird in 3.1.2.4 erörtert.

2.3.3.5. Weißabgleich

Der Algorithmus aus [6] erlaubt die Korrektur pro Pixel und Kanal. Die verschiedenen Kanäle können also in abweichendem Maß gedämpft werden. Wie dies überhaupt zu bewerkstelligen ist, wird in 3.1.1.3 ausgeführt. Unabhängig davon ist aber intuitiv klar, dass Grautöne nach solch einer Modifikation die Eigenschaft der neutralen Färbung verlieren können und auch bei anderen Farben ein Farbstich entstehen kann. Ausgehend von diesem Problem wird der Hinweis gegeben, dass die Korrektur aller drei Kanäle mit der LAM des grünen Kanals keine signifikante Verschlechterung bringt.

3. Implementierung

Die praktische Implementierung des Verfahrens in [6] wird in 3.2 beschrieben. Zuvor ist jedoch eine Reihe theoretischer Vorarbeit nötig. Das Verfahren an sich ist simpel, die Domäne in der es zur Anwendung kommt, jedoch komplex.

3.1. Vorüberlegungen

Vorüberlegungen sind in weit gestreuten Feldern nötig. Während der handwerkliche Teil – die Codierung der Lösung – auf erprobte Pattern baut, sind in der Bewertung der relevanten Objekte und der Umgebung in der die Implementierung zur Anwendung kommt, individuelle Entscheidungen und Lösungen zu finden.

3.1.1. Luminanz-Anpassung

[6] spricht davon, die Luminanz der drei Kanäle Rot, Grün und Blau separat und mit unterschiedlichen Faktoren zu modifizieren. Es werden Möglichkeiten der Umsetzung diskutiert und verglichen. Abbildung 7 wurde bewusst als Beispiel gewählt, da sich Rot, Grün und Blau im Bild finden und anhand der Wolken Farbstiche einfach auszumachen sind.

Zur Veranschaulichung wird folgendes konstruiertes Szenario verwendet: Flächig soll die Luminanz zunächst in allen Kanälen auf 75% gesenkt werden. Zunächst wird die Korrektur mit diesem Faktor durchgeführt, anschließend werden alle Methoden mit drei verschiedenen Werten wiederholt. RGB wird mit Werten von 0 bis 255 beschrieben, Yxy mit 0 bis 100 für Y und 0 bis 1 für x und y.



Abbildung 7

Ausgangsbild

Photo:

Ulla Thomas / pixelio.de

3.1.1.1. Grundfarben-Dimmung

Eine erster naiver Ansatz ist, das das Bild in RGB repräsentiert vorliegt und jeder Pixel mittels

$$f_1(x_R, x_G, x_B) = (x_R * 0,75, x_G * 0,75, x_B * 0,75)$$

modifiziert wird. Abbildung 8 zeigt, das Resultat.

Der Beweis, dass die Chromatizität stabil bleibt und die Luminanz die gewünschte Dämpfung erfährt wird im Folgenden geführt.

Der Faktor der Luminanz-Anpassung soll α sein. Somit gilt für einen RGB-Vektor von Farbe c :

$$\alpha * c = (\alpha * c_R, \alpha * c_G, \alpha * c_B) = c'$$

Mit der in 2.2.1 gezeigten Transformation RGB→CIE-XYZ

$$\begin{bmatrix} R & G & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_R & Y_R & Z_R \\ X_G & Y_G & Z_G \\ X_B & Y_B & Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}$$

ist zunächst für die Luminanz Y zu zeigen, dass

$$\begin{aligned} \alpha * (c_R * Y_R + c_G * Y_G + c_B * Y_B) \\ = \alpha * c_R * Y_R + \alpha * c_G * Y_G + \alpha * c_B * Y_B \end{aligned}$$

gilt; also die Luminanz von c' gleich der von c nach Multiplikation mit Faktor α ist. Die gilt offensichtlich, da α auf der rechten Seite ausgeklammert werden kann und somit links wie rechts dasselbe steht. Vereinfacht:

$$\alpha * Y_c = Y_{c'}$$

Der Nachweis stabiler Chromatizität gelingt ebenfalls. Analog gilt natürlich:

$$\alpha * (c_R * X_R + c_G * X_G + c_B * X_B) = \alpha * c_R * X_R + \alpha * c_G * X_G + \alpha * c_B * X_B$$

$$\alpha * (c_R * Z_R + c_G * Z_G + c_B * Z_B) = \alpha * c_R * Z_R + \alpha * c_G * Z_G + \alpha * c_B * Z_B$$

oder vereinfacht:

$$\alpha * X_c = X_{c'}$$

$$\alpha * Z_c = Z_{c'}$$

Zur Chromatizität gelangt man über die weitere Transformation in CIE-XYZ→CIE-Yxy, siehe



Abbildung 8

Korrektur durch Dimmung der RGB-Kanäle mit konstantem Faktor

2.2.1:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

damit gilt:

$$x_{c'} = \frac{X_{c'}}{X_{c'} + Y_{c'} + Z_{c'}} = \frac{\alpha * X_c}{\alpha * X_c + \alpha * Y_c + \alpha * Z_c} = \frac{\alpha * X_c}{\alpha * (X_c + Y_c + Z_c)} = \frac{X_c}{X_c + Y_c + Z_c} = x_c$$

$$y_{c'} = \frac{Y_{c'}}{X_{c'} + Y_{c'} + Z_{c'}} = \frac{\alpha * Y_c}{\alpha * X_c + \alpha * Y_c + \alpha * Z_c} = \frac{\alpha * Y_c}{\alpha * (X_c + Y_c + Z_c)} = \frac{Y_c}{X_c + Y_c + Z_c} = y_c$$

Die betrachtete Methode erfüllt demnach die Voraussetzungen die Luminanz um den geforderten Faktor zu verändern und dabei die Chromatizität beizubehalten.

Bildlich macht diese Methode nichts anderes, als für jeden Pixel die drei Lichtquellen der additiven Farberstellung durch entsprechend dunklere mit gleicher Chromatizität zu ersetzen.

3.1.1.2. Yxy-Methode

Ein weiterer Ansatz ist, das Bild zunächst in eine CIE-Yxy Repräsentation zu überführen, in dieser Repräsentation die Luminanz anzupassen und schließlich wieder in eine RGB-Repräsentation zu bringen. In 2.2.1 wurde gezeigt, dass die Modifikation von Y in CIE-XYZ auch die Chromatizität verändert. Darum ist der Weg über CIE-Yxy nötig. Aus 3.1.1.1 ist bekannt, dass diese Methode dasselbe Resultat erzeugt und im Gegensatz zu den hier nötigen Transformationen mit drei Multiplikationen auskommt. Somit ist diese Methode nur zu empfehlen, wenn das zu modifizierende Bild schon in CIE-Yxy, – XYZ oder einem anderen Modell, welches Luminanz unabhängig von Chromatizität repräsentiert, vorliegt. Abbildung 9 zeigt das (zu Abbildung 8 identische) Resultat der Methode.



Abbildung 9

Korrektur durch Transformation in CIE-Yxy, Korrektur von Y und Rückführung in RGB.

3.1.1.3. Selektive Grundfarben-Dimmung

[6] spricht davon, LAMs zur Korrektur eines einzelnen Kanals zu erstellen, dabei aber festgestellt hat, dass dies zu Farbstichen führen kann. Ausgehend davon ist wahrscheinlich, dass der RGB-Vektor jedes Pixels nicht wie in 3.1.1.1 mit einem Wert α ,

sondern komponentenweise mit einem Vektor $(\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B)$ multipliziert, also $c = (c_R, c_G, c_B)$ und $c' = (c_R * \alpha_R, c_G * \alpha_G, c_B * \alpha_B)$.

Diese Methode macht grundsätzlich das richtige. Eine Farbe c lässt sich in drei Farben $c_1 = (c_R, 0, 0)$, $c_2 = (0, c_G, 0)$, $c_3 = (0, 0, c_B)$ zerlegen und es gilt nach den graßmannschen Gesetzen $c_{1R} + c_{2R} + c_{3R} = c_R \dots$ Die Luminanz von c_1, c_2, c_3 wird jeweils nur von einem Kanal bestimmt, somit kann das als korrekt bekannte Verfahren aus 3.1.1.1 mit einem der Werte aus $(\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B)$ angewendet werden. Die Summe der drei Farben ergibt c' . Nach den graßmannschen Gesetzen entspricht deren Luminanz der Summe der Farben c_1, c_2, c_3 . Die Chromatizität bleibt jedoch nicht stabil.

Beispielhaft wird auf alle Pixel des Beispielbilds der Vektor $(0.9, 0.75, 0.6)$ angewandt. Der erwartete Stich ins rötliche ist erkennbar. Um diesen Stich zu vermeiden, ist es unumgänglich für den RGB-Vektor einen einheitlichen Faktor zu verwenden. Eine Modifikation des Verfahrens ermöglicht einen Zwischenweg von selektiver Korrektur und Farbechtheit. Aus den Vektoren $(\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B)$ und (c_R, c_G, c_B) lässt sich mittels

$$c_R + c_G + c_B = 0: \alpha = 0$$

$$\text{sonst: } \alpha = (\alpha_R * c_R + \alpha_G * c_G + \alpha_B * c_B) / (c_R + c_G + c_B)$$

ein gewichteter gemeinsamer Faktor ableiten. Die Methode am Beispielbild angewandt, zeigt sich in Abbildung 11. Der Unterschied zu Abbildung 10 ist offensichtlich: Kein Stich ins rötliche, trotzdem bleiben rötliche Bildteile heller, als die zum Ursprungsbild deutlich abgedunkelten blauen Bildteile. Grün bleibt zudem Grün ohne wie in Abbildung 10 Richtung Orange verschoben zu werden, jedoch etwas dunkler als im Ursprung, was der Vergleich mit Abbildung 7 zeigt.

Die erste Methode der selektiven Grundfarben-Dimmung wird das Surface mit der homogeneren Luminanz erzeugen, allerdings ist eine selektive Korrektur nur angebracht, wenn in den unterschiedlichen Kanälen relevant anders zu korrigieren ist. In diesem Fall entstehen Farbstiche mit dieser Methode jedoch per se. Die Verbesserung durch die ausgeglichene Darstellung wird für den Betrachter vom Eindruck „falscher“ Farben überlagert. Daher ist die Bildung eines einzelnen Faktors, durch Gewichtung der selektiven Faktoren, die Methode mit dem größeren Nutzen für den menschlichen Betrachter.



Abbildung 10

Korrektur durch Dimmung der RGB-Kanäle mit eigenem Faktor pro Kanal.



Abbildung 11

Korrektur durch Dimmung der RGB-Kanäle mit interpoliertem Faktor für jeden Pixel

3.1.2. Linearisierung der Messergebnisse

[6] verwendet zur Rekonstruktion linearer Eingaben aus nicht-linearen Aufnahmen ein Vorgehen entliehen aus [13]. Dieser Algorithmus adressiert analoge Aufnahmen auf Film, welche gescannt wurden und somit digitalisiert vorliegen. Der Algorithmus lässt sich auf Digitalkameras übertragen, dass Debevec und Malik sich auf digitalisierte Analogaufnahmen beziehen, wird zudem am Erscheinungsjahr liegen (1998). Auch wird in [13] bereits darauf hingewiesen, dass die Grundlage des Algorithmus die Beziehung zwischen Belichtungszeit und Intensität auf einerseits und der Reaktion einer lichtsensitiven Erfassung andererseits bildet, welche sowohl bei photochemischem, wie auch elektronischen Systemen gilt.

[13] führt aus, dass die Wiedergabe eines Films zu verschiedenen Belichtungen wird durch eine charakteristische Kurve repräsentiert wird. Diese Kurve bildet die optische Dichte (D) des verwendeten Films gegen den Logarithmus der Belichtung ab. Die Belichtung (X) ist dabei das Produkt aus Bestrahlungsstärke (E) auf dem Film und der Belichtungszeit Δt . Die bereits erwähnte grundlegende Eigenschaft ist nun, dass nur das Produkt aus E und Δt entscheidend ist – unterschiedliche Werte mit demselben Produkt führen zur selben optischen Dichte D . Dies gilt nur nicht bei sehr großen oder kleinen Δt). Bei digitaler Erfassung tritt der Effekt aufgrund des entfallenen chemischen Prozesses nicht auf.

Nach der Filmentwicklung und dem Scannen liegt eine digitale Zahl Z vor, welche durch eine nichtlineare Funktion f aus der Belichtung X auf den adressierten Bildpunkt folgte. Ist diese Funktion bekannt, kann die Belichtung über $X = f^{-1}(Z)$ rekonstruiert werden. Diese Umkehrfunktion ist wohl definiert, da f monoton steigend ist [13].

Zunächst werden eine Reihe digitalisierter Aufnahmen gewonnen, mit statischem Motiv bei verschiedenen Belichtungszeiten. Somit gelangt man zu einer Sammlung an Werten $Z_{ij} = f(E_i \Delta t_j)$ – wobei Z_{ij} den Wert des Pixels i bei Aufnahme mit Belichtungszeit Δt_j und Bestrahlungsstärke E_i repräsentiert. Die Umkehrfunktion erfüllt also $f^{-1}(Z_{ij}) = E_i \Delta t_j$. Mit der Anwendung des Logarithmus Naturalis auf beiden Seiten ergibt sich $\ln(f^{-1}(Z_{ij})) = \ln E_i + \ln \Delta t_j$ oder vereinfacht $g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j$ [13]. Bekannt sind aus der Auswertung der gescannten Aufnahmen Paare $Z_{ij} - \Delta t_j$. Somit ist die Funktion $g(Z_{ij})$ und Werte E_i gesucht, welche die mit den bekannten Wertepaare aufgestellten Gleichungen mit geringstem Fehler (quadratische Abweichung) erfüllt. [13] formuliert deshalb die folgende zu minimierende Zielfunktion um die N Werte für $\ln E_i$ und $P = (Z_{max} - Z_{min} + 1)$ Werte für $g(Z)$ zu finden:

$$O = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^P [g(Z_{ij}) - \ln E_i - \ln \Delta t_j]^2 + \lambda \sum_{z=Z_{min}+1}^{Z_{max}-1} g''(z)^2$$

Der erste Term erklärt sich intuitiv, er dient der Minimierung der Abstandsquadrate. Der zweite Term „erzwingt“ eine glatte Funktion. Für die diskrete Wertemenge wird $g''(z) =$

$g(z - 1) - 2g(z) + g(z + 1)$ definiert, ist also minimal, wenn $g(z)$ exakt zwischen den diskreten Nachbarn liegt. Der Vorfaktor λ gewichtet diesen „Glättungs-Term“ gegenüber dem ersten Term und soll auf Grundlage der Belastbarkeit der gewonnenen Daten gewählt werden (also Faktoren wie Bildrauschen berücksichtigen).

3.1.1. Kamera

Zunächst einmal sind Aufnahmen einer hochauflösenden Digitalkamera eine gute Basis für die Kalibrierung eines Multi-Projektor-Systems. Es geht schlussendlich darum, den optischen Eindruck zu optimieren. Trotz hochauflösendem Sensor und Objektiv, ist die digitale Aufnahme zunächst noch nicht geeignet, das Multi-Display-System über einen ersten Eindruck hinausgehend zu analysieren. Eine tiefere Analyse oder gar die Kalibrierung scheitert an verfälschenden Einflüssen, subjektiven



Abbildung 12

Aufnahme, die das Multi-Projektor-System erfasst.

Faktoren und der Auflösung des Multi-Projektor-Systems. Abbildung 12 zeigt eine Aufnahme, welche in annähernd bestmöglicher Ausnutzung des Bildfelds vom VISUS-System erstellt wurde. Verwendet wurde eine digitale Vollformat-Spiegelreflexkamera mit 36MP (Nikon D800) und 60mm Objektiv (AF Micro-Nikkor 60mm 1:2.8D). Vignettierung und Verzeichnung wurde bereits von der Kamera mittels Objektivprofil zufriedenstellend korrigiert. Andere Möglichkeiten zur Korrektur stehen durch Profile für RAW-Converter, Bildbearbeitungsprogramme und Speziallösungen wie PTLens3. An diesem Motiv sollen die angesprochenen Probleme diskutiert werden und Lösungen aufgezeigt werden.

3.1.2. Verfälschende Faktoren

Was automatisiert aus Aufnahmen rekonstruiert und geschlossen wird, kann von einer Reihe Faktoren beeinflusst werden, die außerhalb des beobachteten Systems liegen. Dies sind einerseits physische Objekte im erfassten Bildfeld und andererseits Faktoren des Messvorgangs selbst. Im Folgenden werden diese Problemfelder erörtert und Handlungsweisungen abgeleitet.

³ Software zur Korrektur von Verzeichnung, Chromatischer Aberrationen und Perspektive über grafische Oberfläche oder Kommandozeile

3.1.2.1. Objekte der Umgebung

Abbildung 12 zeigt ein Problem, das dem menschlichen Betrachter in der Bewertung des Motivs nicht zu falschen Ergebnissen führt, die automatisierte Analyse jedoch grundsätzlich behindern kann. Die Leinwand des Multi-Display-Systems befindet sich in Realer Umwelt und nicht in einem idealisierten Modell. Objekte der Umwelt reflektieren Licht oder generieren dieses selbst. Die Detektion von Ecken und Kanten wird mit hoher Wahrscheinlichkeit durch dieses Licht unerwünschte Ergebnisse liefern. Die Wahl einer bestimmten Grundfarbe als flächig anzuzeigende Farbe löst dieses Problem auch nicht. Die reflektierenden Objekte werden ein vergleichbares Spektrum wiedergeben, zudem ohne sonderlich schwächere Intensität.

Die Lösung gelingt über Weltwissen. Die Kamera wird aus statischer Position mit statischer Ausrichtung und Fokussierung verwendet. Somit genügt es einmalig anzugeben, in welchem Bildbereich das Display und Elemente des Displays liegen, bzw. in welchen Bereichen sie nicht liegen. Anschließend kann die Aufnahmen per groben Beschnitt von diesen Objekten befreit werden.

3.1.2.2. Rauschen

Rauschen im Bild nimmt mit der Belichtungszeit und mit der Lichtempfindlichkeit des erfassenden Sensors zu. Dies wird in Abbildung 13 anschaulich. Für die Erfassung des Displays des Multi-Projektor-Systems lässt sich ableiten, dass Parameter der Kamera durchaus durchdacht zu wählen sind. Eine längere Belichtungszeit ist einer höheren Lichtempfindlichkeit vorzuziehen. Damit wird ein verlässlich statischer Kameraaufbau allerdings unverzichtbar. Da der statische Aufbau für den Algorithmus aus [6] jedoch grundsätzlich vorausgesetzt wird, entstehen hieraus keine erweiterte Anforderungen.

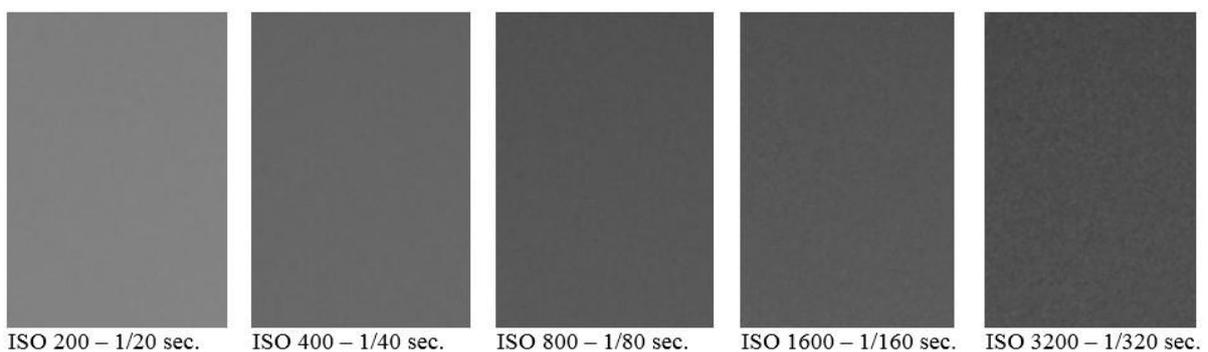


Abbildung 13

ISO-Reihe Nikon D700

3.1.2.3. Auflösung

Das soll vorweg genommen werden: Mit einer Aufnahme der verwendeten Kameras (Nikon D700, Nikon D800) ist eine pixelgenaue Rekonstruktion des gesamten Displays nicht möglich. Abbildung 14 zeigt einen Beschnitt von Abbildung 12, der sich etwa auf das Display beschränkt. Von den rund 36 Megapixeln des Ausgangsmaterials verbleiben rund 19 Megapixel. Das Display selbst hat eine Auflösung von 10800 x 4096 Pixel, also über 44 Megapixel. In 2.3.3.2 wurde aus den Erfahrungen von Majumder und Stevens [6] bereits erwähnt, dass $\frac{1}{5}$ der Auflösung des Displays bereits reichen kann, um mit Vorbehandlung überlappender Bereiche ein korrektes Luminanz-Surface zu rekonstruieren, in einigen Fällen aber noch bis $\frac{1}{3}$ der Auflösung Artefakte generiert wurden.

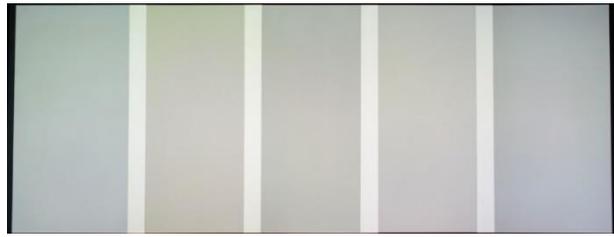


Abbildung 14

Grober Beschnitt von Abbildung 12 auf den relevanten Bereich.

Mit dem gegebenen Material, liegen sogar mehr als $\frac{1}{2}$ der Displayauflösung vor. Damit ist man, dieser Erfahrung folgend, auf sicherem Terrain bezüglich des Luminanz-Surfaces. [6] greift bei Unsicherheit aufgrund fehlender Auflösung zur Interpolation über die 4 nächstgelegenen Pixel. Dies muss sicher ebenso gemacht werden, um die Gültigkeit der $\frac{1}{5}$ - bzw. $\frac{1}{3}$ -Grenze zu gewährleisten.

Eine pixelgenaue geometrische Kalibrierung ist mit $\frac{1}{2}$ Auflösung trotzdem nicht möglich. Nach dem Abtasttheorem müssten in diesem Anwendungsfall mindestens 88 Megapixel vorliegen, also mehr als das 4-fache des vorhandenen.

3.1.2.4. Verschmutzungen

Einerseits können Verschmutzungen auf dem Display vorhanden sein, andererseits können diese auch auf Seiten der Kamera auftreten. Insbesondere können Verschmutzungen und Staub auf dem Sensor die Resultate relevant verschieben. Abbildung 15 zeigt die Auswirkung einer solchen Verschmutzung und die Abhängigkeit von der Blende. Auf dem Sensor einer Nikon D700 befindet sich etwas Staub, Öl, Abrieb oder sonstige Ablagerung. Abbildung 15 ist ein Beschnitt auf 10% Bildbreite und 10% Bildhöhe. Somit ist der Faktor der Auflösung eingeklammert, bei jeder anderen Kamera mit ähnlich großem Sensor, wird die Auswirkung vergleichbar sein. Bei weiter geöffneter Blende ist kaum eine Auswirkung zu sehen. Umso weiter

die Blende geschlossen wird, umso schärfer und markanter wird sie jedoch. Bei den Blenden $f/8$ und $f/11$ ist die Auswirkung flächiger und fokussiert sich mit steigender Blende.

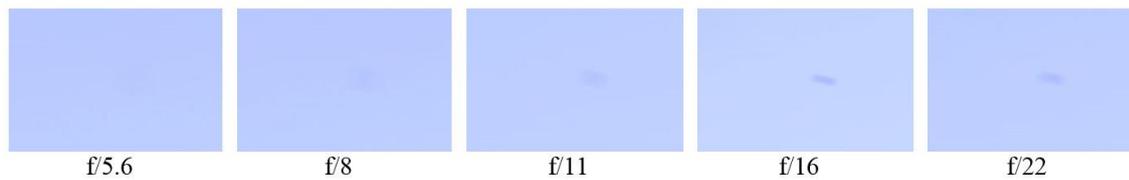


Abbildung 15

Verschmutzung des Kamerasensors und seine unterschiedlichen Auswirkungen auf die Aufnahmen abhängig von der Blende.

Gerade dort, wo [6] empfiehlt die Blende anzusetzen (größer $f/8$, siehe 2.3.3.4), wird die in Abbildung 15 gezeigte Verschmutzung relevant. Allerdings ist die Empfehlung relativ zu bewerten. Die zugrunde liegende Kamera hat kein Wechselobjektiv, keinen klappenden Spiegel und möglicherweise auch keinen mechanischen Verschluss vor dem Sensor. Damit fallen die möglichen Ursachen einer Verschmutzung der gezeigten Art weg. Diese Kamera hat zudem ein Teleobjektiv mit 3-fach Zoom, welches jedoch aufgrund des geringen Aufmaßes und geringer Sensorgröße kompakt konstruiert wurde. Es ist anzunehmen, dass mit dieser Kamera bei gleicher Blende Randbereiche stärker in der Helligkeit abfallen, als sie das mit einer Vollformatkamera mit Festbrennweite tun. Zudem lässt sich der Randabfall mit den verwendeten Kameras (Nikon D700, Nikon D800) automatisiert korrigieren.

Da das Problem, welches zur Empfehlung von Blenden jenseits $f/8$ geführt hat, so nicht mehr existiert, kann die Empfehlung übergangen werden. Eigene Versuche, u.a. Abbildung 15, führen für die Kombination einer digitalen Vollformat-Spiegelreflexkamera mit dem Objektiv AF Micro-Nikkor 60mm 1:2.8D zu einer Blende um $f/5.6$. In der eigenen Implementierung wird eine Blende von $f/6.3$ verwendet.

3.1.3. Material und Standpunkt

Der Einfluss von Material und Standpunkt des Betrachters wurde in 2.1.2.1 thematisiert. Nun soll dazu zunächst eine Einschätzung gewonnen und anschließend ein praktisches Vorgehen abgeleitet werden.

In Abbildung 16 (Links) ist eine vereinfachte Situation skizziert. Zwei Betrachter (rote Kreuze) blicken aus 4 bzw. 8 Metern Entfernung auf eine 8 Meter breite Leinwand. Während für den hinteren Betrachter die längste Entfernung zu einem Bildpixel auf der Leinwand (auf Augenhöhe) etwa 12% größer ist, als der Weg zur Leinwandmitte, beträgt die Differenz für den anderen Betrachter bereits rund 41%. Die Erweiterung der Situation um eine dritte Dimension verstärkt die Abweichungen zusätzlich. Angenommen die Leinwand ist drei Meter hoch und die Betrachter befinden sich auf 1,5m Höhe, an selber Stelle wie zuvor, dann sind

die Abweichungen zwischen kürzester und längster Strecke auf der Leinwand bereits rund 13% bzw. 46%. Abbildung 16 (Rechts) zeigt die Situation. Die Resultate dramatisieren sich, wenn der Betrachter parallel zur Leinwand verschoben wird.

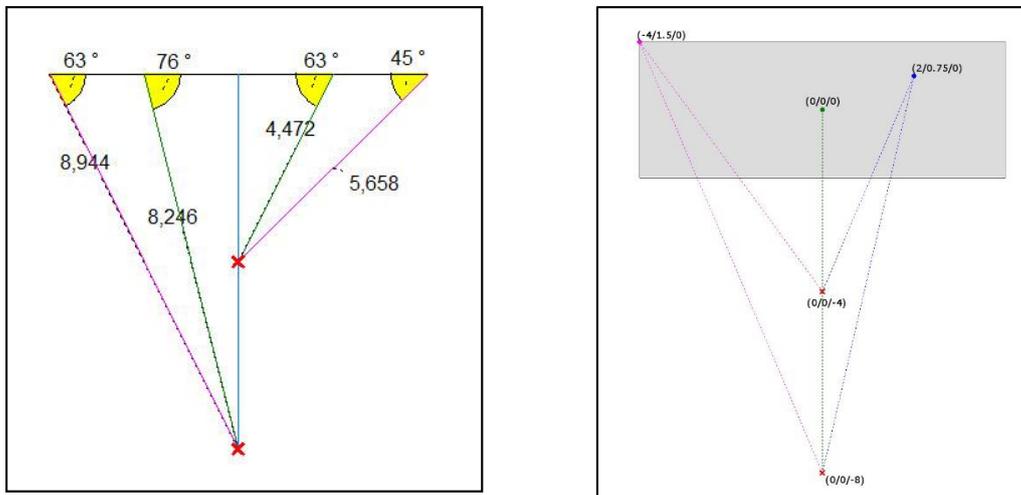


Abbildung 16

Links: 2-Dimensionale Darstellung der Abstände und Winkel zweier Betrachter an verschiedenen Positionen zu Punkten der Leinwand.

Rechts: 3-Dimensionale Darstellung derselben Situation.

Das Problem scheint nicht lösbar. Wird von einer spezifischen Position im Raum per Kamera aufgenommen, kann eine Korrektur erfolgen, die dieser Position gerecht wird. Für andere Positionen kann damit sogar eine Verschlechterung in der Wahrnehmung des zusammengesetzten Displays als Einheit einhergehen. Einerseits hat der Betrachter positionsabhängig die unterschiedlichsten Blickwinkel zu den Pixeln des Displays. Andererseits geht die Positionierung des Betrachters mit spezifischen Entfernungen zu all diesen Pixeln einher.

Praktisch ist das Problem jedoch gut lösbar. Umso näher der Betrachter ans Display rückt, umso weniger nimmt er das ganze Display zeitgleich wahr. Die Wahrnehmung des ganzen Displays hat einen optimalen Betrachtungsabstand, der etwa bei Fernsehgeräten in Abhängigkeit von der Auflösung des Geräts erfahrungsgemäß zwischen zwei- und dreifacher Bildschirmdiagonalen liegt. Unabhängig vom Faktor der Auflösung von Auge und Ausgabegerät kann das Gebrauchsblickfeld als Referenz dienen. Dieses beträgt nur etwa 20° [15]. Somit fällt die Situation kritisch naher Distanzen weniger stark ins Gewicht. Die globale Korrektur adressiert den Betrachter der das globale Display wahrnimmt. Ist der Raum nicht groß genug, bietet sich der am weitesten vom Display entfernte zentrale Platz zur Aufnahme/Betrachtung an.

Abbildung 17 (links) zeigt auf der y-Achse die Abweichung der längsten Entfernung zum direkten Weg an. Der Betrachter ist in dieser zweidimensionalen Szene zentral positioniert. Die x-Achse repräsentiert das Verhältnis des direkten Wegs zur Displaybreite. Die orangene Linie

identifiziert das Abstands-Verhältnis ab dem die gesamte Displaybreite ins Gebrauchsblickfeld des Betrachters fällt. Links dieser Linie nimmt der Betrachter, unter der 20%-Annahme, nicht das gesamte Display gleichzeitig wahr. An dieser Linie beträgt die Abweichung noch etwa 1,5%. Abbildung 17 (rechts) zeigt die zur selben Szene gehörende Situation am äußersten Pixel des Displays (linke Seite und rechte Seite). Der Winkel einer direkten Verbindungslinie Pixel-Betrachter zum Display hat die abgebildete Öffnung.

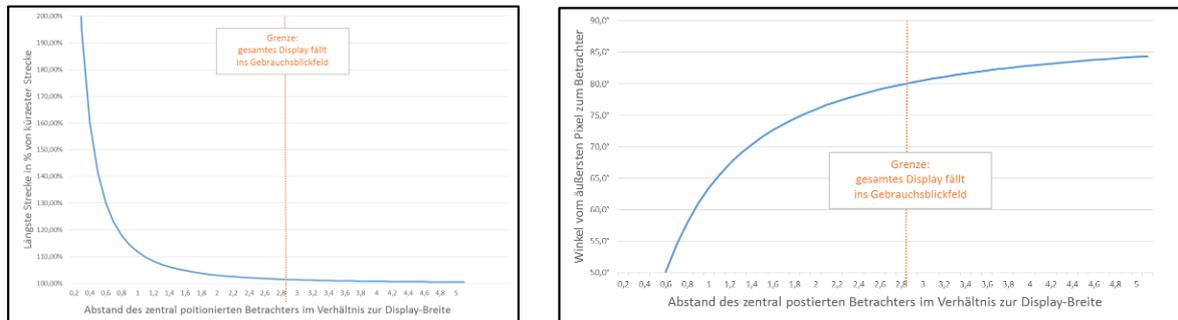


Abbildung 17

Links: Verhältnis des kürzesten zum längsten Sichtstrahl in Abhängigkeit zum Betrachtungsabstand.

Rechts: Entwicklung des maximalen Blickwinkels abhängig vom Betrachtungsabstand.

Der Materialeinfluss ist komplexer, von anderen Effekten überlagert und aufwendig zu quantifizieren. Die Kamera soll deshalb zentral vor der Leinwand (vergl. Abbildung 5) und mit größtmöglichem Abstand zum Display positioniert werden. Abbildung 7 zeigt für die vorgefunden Räumlichkeit einen Winkel von 72° für die äußeren Pixel im zweidimensionalen Fall. Die dadurch positionsbezogenen Eigenheiten werden nicht korrigiert. Die Eigenheiten verlaufen fließend über die Fläche, wenn davon ausgegangen wird, dass sie mit einer stetigen Funktion mit dem Schnittwinkel des Pixels⁴ als Variable beschrieben werden können. Diese Annahme wird getroffen.

⁴ Genauer: $f(\omega_{xy})$ mit $\omega_{xy} \equiv$ Schnittwinkel zwischen dem Display und der Geraden durch Displaypixel(x,y) und der Position des Betrachters.

Die gefundene Position ist ebenfalls aus Sicht der Distanzen der Displaypixel zu Betrachter für die gegebenen Bedingungen ideal. Aus der Szene in Abbildung 18, die ähnlich der realen Situation des Multi-Projektor-Systems der Universität Stuttgart ist, geht hervor, dass im 2-dimensionalen Fall der längste Sichtstrahl etwa 104% vom kürzesten beträgt. Damit wird in Abwägung der möglichen Ungenauigkeiten einer Korrektur mit der zu erwartenden Genauigkeit der generierten LAMs entschieden, auf die Korrektur zu verzichten.

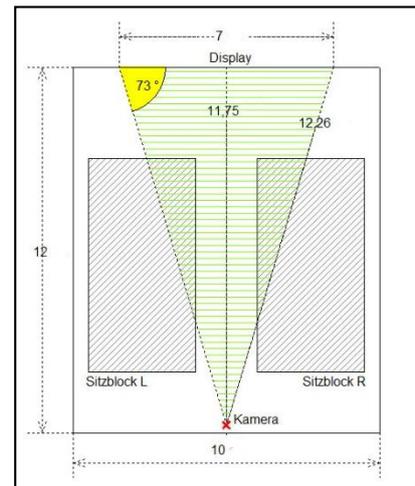


Abbildung 18

Ein alternatives Verfahren die positionsabhängigen Einflüsse zu minimieren ist eine Parallelverschiebung der Kamera zum Display. Es wird darauf verzichtet das Display mit Aufnahme von einer Position zu erfassen. Dafür werden Abschnitte – praktischerweise das Displaybild je eines Projektors – einzeln erfasst. Die Kamera wird dafür zentral vor den zu erfassenden Abschnitt auf der x-Achse verschoben. Der Vorteil liegt in kleineren Unterschieden in den Entfernungen zu den Displaypixeln und den Schnittwinkeln. Praktisch ist dieses Vorgehen jedoch sehr aufwendig. Es steht Einrichtung im Blickfeld und die Kamera muss mit dem PC der Server-Komponente per Kabel verbunden sein.

3.1.4. Repräsentation

Wie in 2.3 beschrieben, besitzt die Karte für jeden Pixel des Displays einen Eintrag $l_{x,y} \in \{x \in \mathbb{Q} \mid x \geq 0 \wedge x \leq 1\}$. Um die Definition einer eigenen Datenstruktur zu vermeiden, wird l_{xy} mit dem Faktor 100 multipliziert und durch ein 8bit-Graustufenbild repräsentiert. Damit wird der 8bit-Bereich nur zu etwa 40% ausgenutzt, jedoch vereinfacht die Beschränkung auf den Bereich 0_2 bis 1100100_2 die Handhabung, da der Wert direkt als Prozentwert interpretiert werden kann. Durch die Abbildung in die Menge $\{x \in \mathbb{N} \mid x \geq 0 \wedge x \leq 100\}$ gehen zudem Informationen ab der dritten Nachkommastelle verloren. Dies ist hier akzeptabel, da auf dem Weg zu den Einträgen $l_{x,y}$ Unsicherheiten und Ungenauigkeiten vorhanden sind, die einer exakteren Angabe sowieso entgegenstehen, zudem wird eine Möglichkeit benötigt, Luminanzen größer 100% zu repräsentieren (siehe 3.1.3). LAMs der verschiedenen Kanäle (Red, Green, Blue) der Projektoren oder anderem Bezug werden durch dieselbe Struktur repräsentiert. Die Unterscheidung ist in der Anwendung zu treffen. Theoretisch ergäbe sich die Möglichkeit, die LAMs der drei Kanäle in einem RGB-Bild mit 8bit pro Kanal zu verwalten. Die Repräsentation

als Graustufenbild bringt den Vorteil, dass von OpenCV5 bzw. EmguCV6 bereitgestellte Funktionen und Objektmethoden verwendet werden können.

3.1.1. Geometrische Kalibrierung

Die Zuordnungen zwischen Projektor-, Display- und Kameraraum können über die Erkennung von Projektorvierteln im Kameraraum gewonnen werden. Zu jedem Viertel eines Projektors (halbe Höhe Projektorfeld, halbe Breite Projektorfeld) sind die geometrischen Beziehungen im Displayraum und in den Projektorräumen theoretisch bekannt. Da die Beziehungen zwischen Projektorenräume und Displayraum einige Unsicherheit aufweisen, wird der Displayraum in der praktischen Implementierung „gestrichen“. Die nötigen Modifikationen am Verfahren werden in 3.2 erarbeitet.

Die Kalibrierung basiert auf zwei Schritten. Zunächst werden Ecken der Projektorviertel erkannt und in einem zweiten Schritt daraus Matrizen für die Transformation vom Kameraraum in die Projektorräume berechnet.

3.1.1.1. Corner-Detection

Um die Rechtecke zu erkennen, die zur geometrischen Kalibrierung erfasst werden und ihre Position in den erzeugten Aufnahmen zu bestimmen, werden ihre vier Ecken bestimmt. Da Ecken grundsätzlich gute Merkmale für die Objektverfolgung sind, finden sich hier Verfahren um Ecken zu bestimmen. Das Verfahren von Moravec basiert auf der Bestimmung der durchschnittlichen Helligkeit in einem kleinen Fenster der Aufnahme und dem Vergleich mit der durchschnittlichen Helligkeit nach verschiedenen kleinen Verschiebungen des Fensters (jeweils von der Ursprungsposition aus) [16]. Andere Verfahren optimieren diesen Ansatz, vor allem die Anisotropie des Moravec-Verfahrens und die „voreilige“ Registrierung von Ecken [16, 17]. Auf Autokorrelationsfunktionen basierende Verfahren wie das von Harris und Stephens ([16]) oder Shi und Tomasi ([17]) bieten sich an. Implementierungen beider Verfahren sind in der OpenCV Programmbibliothek enthalten, verwendet wird in der praktischen Implementierung das zweite.

3.1.1.2. Perspektivische Transformation

Mit den erkannten Koordinaten der vier Ecken eines Projektor-Viertels in einer Aufnahme und den bekannten Koordinaten der korrespondierenden Ecken in einem Projektorraum lässt sich die Transformation der Aufnahme in diesen Projektorraum berechnen. [18] beschreibt die Berechnung einer strukturhaltenden Transformation. Mit vier bekannten Punkten im

⁵ Von Intel und Willow Garage entwickelte freie Programmbibliothek zu Bildverarbeitung und maschinellem Sehen in C und C++.

⁶ .Net Wrapper der OpenCV Programmbibliothek

Ausgangsraum und den dazugehörigen vier Punkten im Zielraum lässt sich eine korrekte Transformationsmatrix der homogenen Koordinaten bestimmen. Koordinaten im Zielraum werden mit großen Buchstaben bezeichnet, im Ausgangsraum mit kleinen Buchstaben. Somit gilt:

$$\begin{array}{r} XW \\ [YW] \\ W \end{array} = \begin{array}{r} a \quad b \quad c \quad x \\ [d \quad e \quad f] * [y] \\ g \quad h \quad 1 \quad 1 \end{array}$$

Da offensichtlich $W = g * x + h * y + 1$:

$$\begin{array}{r} X \\ [Y] \\ 1 \end{array} = \frac{\begin{array}{r} a \quad b \quad c \quad x \\ [d \quad e \quad f] * [y] \\ g \quad h \quad 1 \quad 1 \\ x \end{array}}{\begin{array}{r} [g \quad h \quad 1] * [y] \\ 1 \end{array}}$$

Für die Berechnung der Koordinaten im Zielraum genügt also:

$$X = \frac{ax + by + c}{gx + hy + 1}$$

$$Y = \frac{dx + ey + f}{gx + hy + 1}$$

Die acht Parameter a, b, c, d, e, f, g, h lassen über die acht Gleichungen

$$\begin{array}{cccccccc} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_1x_1 & -X_1y_1 & a & X_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -Y_1x_1 & -Y_1y_1 & b & Y_1 \\ \cdot & c & X_2 \\ \cdot & d & Y_2 \\ x_8 & y_8 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_8x_8 & -X_8y_8 & f & Y_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_8 & y_8 & 1 & -Y_8x_8 & -Y_8y_8 & g & X_4 \\ & & & & & & & & h & Y_4 \end{array} [e] = \begin{bmatrix} Y_2 \\ X_3 \end{bmatrix}$$

ermitteln [18]. Die benötigten acht Punkte – vier im Ausgangsraum, vier korrespondierende im Zielraum – sind im Anwendungsfall bekannt.

Da die OpenCV Programmbibliothek ebenfalls eine Implementierung des Verfahrens und der Anwendung der gewonnenen 3x3-Matrix beinhaltet, sind die informationstechnischen Anforderungen an die Erkennung der Projektorviertel und ihre Transformation vom Kameraraum in den Projektorraum erfüllt.

3.1.2. Linearisierung der Aufnahmen

Der Algorithmus aus [6] ist auf linearisierte Ausgaben der Kamera und das Wissen über die Funktion zwischen Projektor-Input und Display-Output angewiesen. Andernfalls funktioniert die Korrektur des Displays über prozentuale Dimmung des Projektor-Inputs abgeleitet von Aufnahmen einer Kamera nicht. Das erste Problemfeld ist nicht-lineare Beziehungen zwischen Belichtung und Ausgabe der verwendeten Kamera. Dies lässt sich etwa nach dem in 3.1.2 erläuterten Verfahren lösen. Das zweite Problemfeld stellen die nicht-linearen Beziehungen zwischen dem Projektor-Input und dem was auf dem Display beobachtbar ist dar. [6] löst dieses Problem über die probeweise Messung dieses Zusammenhangs mittels Photometer und Herleitung einer passenden Funktion.

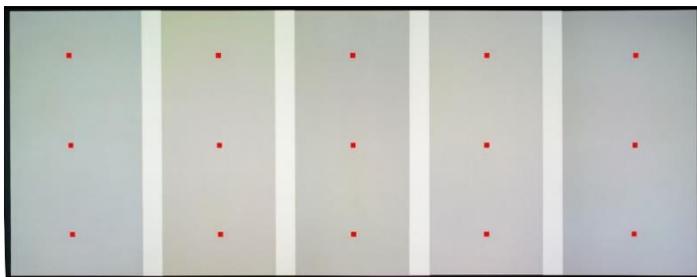


Abbildung 19

15 Messfelder der Luminanz Erfassung zu definiertem Projektor-Input rot markiert.

wird das Display beginnend bei maximalem Input aller Projektoren, aus statischer Position, mit statischen Kameraeinstellungen heraus, aufgenommen. Die Luminanz wird schrittweise reduziert und das auf der Leinwand sichtbare von der Kamera erfasst. Schließlich wird die durchschnittliche Luminanz an festen Flächen in den Aufnahmen ermittelt und der Zusammenhang zum Projektor-Input in Form eines Polynoms hergestellt. Einschränkend gilt, dass der Zusammenhang nur für die spezielle Einstellung der Kamera gilt und alle belichtungsäquivalente Kombinationen aus Blende, Belichtungszeit und Sensorempfindlichkeit.

Somit ist das Gesamtproblem in zwei Schritten gelöst. Allerdings ist die Ausgangssituation nun eine komfortablere. Die verwendete Kamera ist keine aus der Anfangszeit der digitalen Fotografie, sondern eine Kamera mit wesentlich größerem Sensor und deutlich größerem Dynamikumfang. So gelingt es die Dynamik des Displays aufzulösen und das Gesamtproblem in einem Schritt zu lösen. Hierzu

Abbildung 19 zeigt die Aufnahme des Displays bei maximalem Input. Die drei Messfelder je Projektor sind 50x50 Pixel groß und nachträglich rot in der Aufnahme markiert worden. In Abbildung 20 sind die Aufnahmen für 80%-Luminanz (Oben), 40%-Luminanz (Mitte) und 20%-Luminanz (Unten) gegenübergestellt. Die Belichtung wurde so gewählt, dass die Aufnahme exakt dann eine Luminanz von 0% angibt, wenn dies auch der Input des Projektors ist. Der Vorteil dieser Wahl ist, dass bei folgenden Aufnahmen auf die Subtraktion des Black-Offsets verzichtet werden kann. Die gefundene Einstellung ist ISO 200, f/6,3 und 1/3 Sek. Die Empfindlichkeit ist durch 3.1.2.2 gegeben, die Blende durch 3.1.2.4 und mit der freien Variablen Belichtungszeit wird die Bedingung erfüllt, Black-Offsets zu vermeiden.

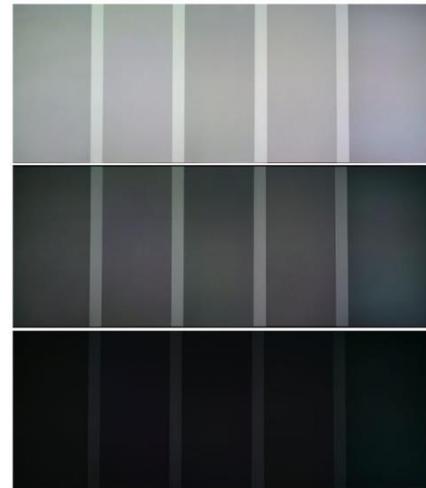


Abbildung 20

Aufnahmen für Projektorinput mit Luminanz 20% (Unten), 40% (Mitte) und 80% (Oben).

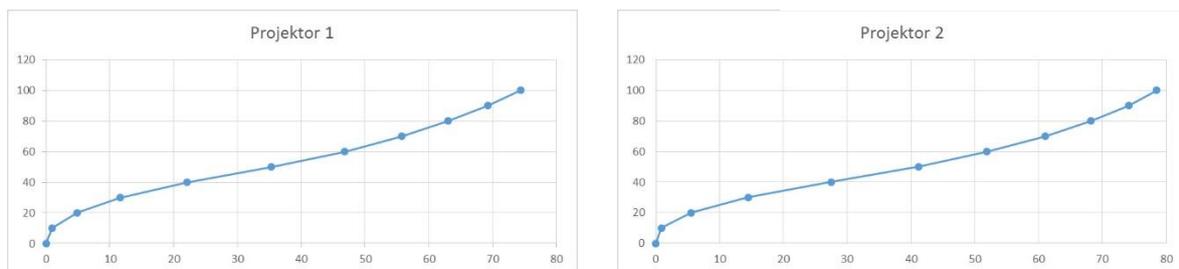


Abbildung 21

Links: Beziehung Kamera-Output (x-Achse) und Projektor-Input (y-Achse) des 1. Projektors v.L. oberstes Messfeld (Abbildung 19)

Rechts: Selbe Beziehung für 2. Projektors v.L. oberstes Messfeld (Abbildung 19)

Die Resultate lassen sich in Form von Diagrammen veranschaulichen. Abbildung 21 (links) zeigt die Beziehung für das obere Messfeld des ersten Projektors und Abbildung 21 (rechts) für das obere Messfeld des zweiten Projektors von links. Die x-Achse repräsentiert die aus der Aufnahme extrahierte Luminanz, die y-Achse den Input des Projektors, also die Luminanz von 0 bis 100%. Auf dem Display gibt es drei Messfelder pro Projektor. Somit liegen 15 Kurven vor. Die Charakteristik ist bei allen 15 Kurven vergleichbar und liegt in ähnlicher Position. Messfeld 2 liegt etwa im Zentrum des Projektorfelds. Die Wiedergabe ist in diesem Bereich heller, als Messfeld 1 (oben) und Messfeld 2 (unten).

Eine von den 15 Kurven abgeleitete Funktion birgt eine Einschränkung: Ist die Luminanz von 100% als maximale Luminanz definiert, können hellere Bereiche trotzdem nur diesem Wert zugeordnet werden. Aus dem Kontext ergibt sich jedoch die Notwendigkeit, über die gemess-

senen Werte hinaus zu gehen. In den überlappenden Bereichen sind Luminanzen in der Wiedergabe auf dem Display möglich, die von einem einzelnen Projektor nicht erreichbar sind. Somit muss es möglich sein, diese Wiedergabe zu quantifizieren. Da die von der Aufnahme der Kamera abgeleitete Luminanz der Wiedergabe kein absolutes Maß ist, ebenso wie die Quantifizierung der Luminanz des Projektor-Inputs, können diese linear transformiert werden, ohne die Kurven zu verändern. Der Projektor-Input könnte jeweils mit halben Wert angegeben werden. Noch einfacher ist es, schlicht Luminanzen größer 100% zu erlauben. Somit wird das Problem ohne Transformation der Wertebereiche gelöst. Für den Bereich des Projektor-Inputs über 100% gibt es nun aber keine Messwerte der Kamera. Dieses Problem wird später gelöst.

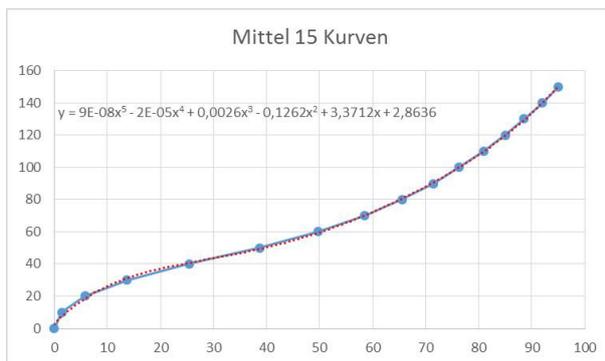


Abbildung 22

Zusammenhang zwischen Kamera-Output (x -Achse) und Projektor-Input (y -Achse) gemittelt aus 15 Messfeldern.

nimal benötigt. Das mittels Regressionsanalyse bestimmte Polynom 4. Ordnung lautet:

$$\begin{aligned}
 y(x) = & -0,00000290903633752628 x^4 \\
 & + 0,000844482015776932 x^3 \\
 & - 0,0659454301252911 x^2 \\
 & + 2,66487581955742x \\
 & + 3,91239623952235
 \end{aligned}$$

Allerdings zeigt der letzte Parameter (3,9...), dass die Funktion nicht annähernd durch den Ursprung läuft. Um ein Polynom noch größerer Ordnung zu vermeiden, wird der Bereich bis $x = 10$ über ein anderes Polynom 4. Ordnung bestimmt. Die dazu gehörige Kurve ist in Abbildung 23 eingezeichnet. Dieses Polynom durchläuft den Ursprung nah genug und entspricht den Messwerten im Abschnitt bis $0 \leq x \leq 10$ mit akzeptabler Abweichung. Die Funktion wird in folgenden aufgeführt:

Aus den 15 Kurven lässt sich eine Durchschnittskurve bilden. Über $y = 100$ bzw. $x \approx 76$ gibt es keine Daten mehr, an denen die Kurve fortgeführt werden könnte. Aus diesem Grund werden bis zu $x = 95$ y -Werte festgelegt, welche die Kurve „harmonisch“ weiterführen. Diese Weiterführung wurde per Hand festgelegt. Abbildung 22 zeigt diese Kurve. Wenn die in 2.3.2.1 beschriebene Vorbehandlung der überlappenden Bereiche mit passender Funktion durchgeführt wird, wird der Bereich für $y > 100$, bzw. $x > 76$ nur minimal benötigt.

$$\begin{aligned}
y(x) = & -0,00436582820835369 x^4 \\
& + 0,141021667188205 x^3 \\
& - 1,59229780537728 x^2 \\
& + 8,73696692168166 x \\
& + 0,207034547982871
\end{aligned}$$

Die Inverse Funktion, also der Kamera-Wert abhängig vom Projektor-Input, lässt sich ebenfalls über eine Regressionsanalyse bestimmen. Abbildung 24 zeigt die Messwerte zusammen mit der gefundenen Funktion. Diese Funktion wird bei der Generierung der LAMs nicht benötigt und wird deshalb nicht exakter angegeben, als in Abbildung 24 eingetragen.

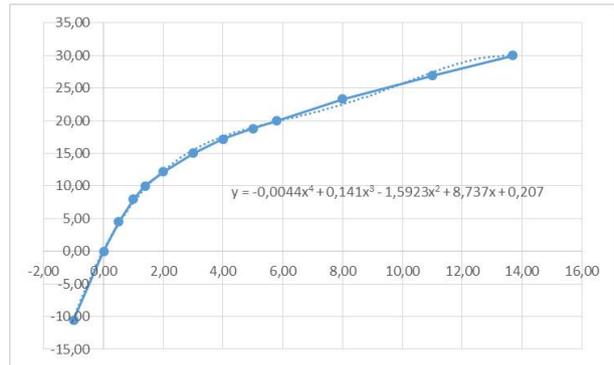


Abbildung 23

Verbessertes Teilstück der Funktion aus Abbildung 22

Die Generierung der LAMs funktioniert nun so, dass bei der Ableitung eines Luminanz-Surfaces aus Aufnahmen der Kamera die Funktion verwendet wird. Der Wert jedes Pixels sagt also aus, welchem Projektor-Input der Wert entsprechen könnte. Nach Wahl der allgemein erreichbaren Wiedergabe (l_{min}) aus einem so transformierten Wert, wird die LAM wie folgt erzeugt: Für jeden Punkt $l_{x,y}$ des Luminanz-Surface des Displays, ist $l_{min}/l_{x,y}$ der Wert der LAM. Dies funktioniert im nicht überlappenden Displaybereichen exakt genug, da somit der Faktor zwischen angenommener Luminanz des Inputs und gewünschter Luminanz des Inputs bestimmt wird. Die Anwendung des Faktors auf den Projektor-Input bewirkt also, dass die Kamera den passenden Wert erfasst (nach Anwendung der Transformation).

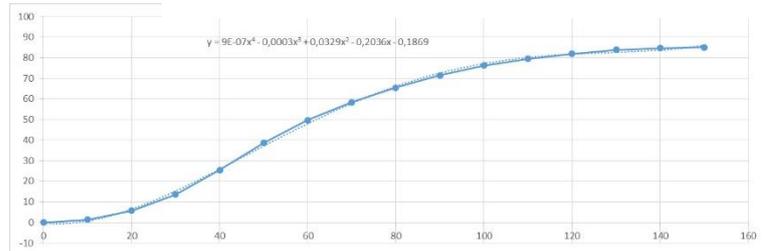


Abbildung 24

Beziehung und Projektor-Input (x-Achse) Kamera-Output (y-Achse).

Allerdings nimmt diese Methode wissentlich etwas an, das nicht so ist: Es ist sehr wohl bekannt, welcher Projektor-Input zur ermittelten Luminanz $l_{x,y}$ geführt hat, nämlich der, der bei Erstellung der Aufnahme verwendet wurde. Dies kann bei einem monotonen Bild mit

Sicherheit angegeben werden, bei anderen Motiven zumindest mit gewisser Unsicherheit bezüglich der Exaktheit der geometrischen Kalibrierung.

Trotzdem kann mit dieser falschen Annahme gearbeitet werden. Umso dunkler ein Pixel ist, desto falscher ist die Annahme. Umso näher liegt seine Wiedergabe aber auch an der allgemein erreichbaren Wiedergabe. Somit ist zwar die Annahme besonders falsch, jedoch bewirkt die Korrektur nur eine kleine Änderung. Deshalb kommt der Fehler dort wo er am größten ist, am wenigsten zum Tragen. Andererseits wird die getroffene Annahme über den Projektor-Input umso genauer, umso weiter sich der Pixel der Luminanz 100 (nach Transformation) von unten nähert. Deshalb ist dort, wo durch die LAMs große Korrekturen definiert werden, die Annahme korrekter.

Für die Bereiche überlappendender Projektoren, ist eine weitere Anpassung nötig. Diese wird in 3.1.3 beschrieben.

3.1.3. Addition überlappender Darstellungen



Abbildung 25

Rekonstruktion des Luminanz-Surface mittels einfacher Addition überlappender Bereiche

Mit den in 3.1.2 erarbeiteten Transformation lässt sich vom Kamera-Output auf Projektor-Input und vom Projektor-Input auf Kamera-Output schließen. Damit ist die Addition der Luminanzen überlappender Bereiche jedoch noch nicht mit korrekter Summe möglich. Abbildung 25 zeigt ein korrigiertes Display, wobei überlappende Bereiche mit einfacher Addition rekonstruiert wurden. Neben dem offen-

sichtlich vorhandenen Fehler in der gezeigten Korrektur, leuchtet auch schon in der Theorie ein, dass die einfache Addition nicht angebracht ist. Nach den in 3.1.2 veranschaulichten Zusammenhängen (Abbildung 22, Abbildung 23, Abbildung 24) kann nicht davon ausgegangen werden, dass lineare Zusammenhänge zwischen Projektor-Input und Kamera-Output bestünden. Die Annahme, ein beliebiger Input x und ein überlagerter beliebiger Input y , würden für den Betrachter denselben Eindruck erzeugen, wie der Input $c = (a + b)$ eines einzelnen Projektors, kann nicht gemacht werden. Auch wenn in der vorangegangenen Betrachtung stets die Einheit von Projektor und Kamera untersucht wurde – und es theoretisch möglich ist, dass sich der Projektor vollkommen linear verhält, die Kamera die beobachtete nicht-Linearität verursacht – muss ein Ersatz für die Addition gefunden werden, der mit der nicht-Linearität umgehen kann.

Dieser Ersatz soll die Funktion add sein. Diese Funktion ist entweder eine Funktion mit zwei Parameter $add(a, b)$ oder für jeden Input a_i besteht eine Funktion $add_{a_i}(b)$, wobei das Ergebnis in beiden Fällen dem entspricht, was die Kamera bei einem einzelnen Projektor mit Input $c = (a + b)$ bzw. $c = (a_i + b)$ beobachten würde.

Die Rekonstruktion von $add(a, b)$ erscheint komplex. Wird die Eingabe von a, b auf diskrete Werte $\{0, 1, 2, \dots, 99, 100\}$ beschränkt und wird davon ausgegangen, dass $add(a, b) \equiv add(b, a)$ gilt⁷:

$$\frac{(n + k - 1)!}{(n - 1)! k!} = \frac{(101 + 2 - 1)!}{(101 - 1)! 2!} = 5151$$

Die Gewinnung einer praxistauglichen zweistelligen Funktion mit einem Bruchteil an Eingabe-Ausgabe Kombinationen wird kaum gelingen. Der Aufwand diese Kombinationen großflächig abzudecken, ist jedoch zu groß. Der Ansatz für jeden möglichen Wert für a_i eine eigene Funktion $add_{a_i}(b)$ zu beschreiben, ist selbst im genannten diskreten Wertebereich aufwendig. Die nötige Wissensbasis über Eingabe-Ausgabe Kombinationen wird sich nicht vom vorherigen Ansatz unterscheiden.

3.1.3.1. Kartenalgorithmus

Die Idee das Problem durch Polynome, Splines oder ähnlichem zu lösen, wird zugunsten eines Algorithmus mit geringerer Zeitkomplexität der Implementierung verworfen. Der entworfene Kartenalgorithmus besitzt eine Wissensbasis aus bekannten Kombinationen zweier Eingabeparameter a, b und zugehöriger Beobachtung c . Die in einem idealen Umfeld anzunehmende Kommutativität von a, b wird ignoriert. Somit lässt sich eine zweidimensionale Karte erstellen, auf der c am Ort (a, b) eingetragen wird. Die Güte des Algorithmus steigt mit der Menge der bekannten (beobachten) Kombinationen. Eine einseitige Belegung der Karte erhöht die Präzision in einem „Hotspot“, verbessert diese für Kombinationen außerhalb jedoch nicht.

Wird der Kartenalgorithmus $map(a, b)$ auf die Eingabe (a_i, b_i) angesetzt, werden die vier Einträge in der Karte mit geringster Entfernung zu (a_i, b_i) ermittelt. Diese sollen c_1, c_2, c_3, c_4 mit Abständen d_1, d_2, d_3, d_4 zum Kartenpunkt (a_i, b_i) sein. Der mittels

$$\frac{\frac{c_1}{d_1} + \frac{c_2}{d_2} + \frac{c_3}{d_3} + \frac{c_4}{d_4}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3} + \frac{1}{d_4}}$$

⁷ Kombination mit Wiederholung

ermittelte abstandsgewichtete Wert, bildet Zwischenergebnis r_1 . Dasselbe Verfahren mit Eingabe (b_i, a_i) bildet Zwischenergebnis r_2 . Die Wiedergabe $\frac{(r_1+r_2)}{2}$ mittelt zwei symmetrische Orte der Karte. Somit wird möglichen Fehlern und Ungenauigkeiten in der Generierung der Wissensbasis Rechnung getragen.

Zur Vereinfachung der Generierung der Wissensbasis werden Messwerte für ein regelmäßiges Muster auf der Karte gewonnen. Hierzu werden für a und b separat 11, über die Beobachtung möglicher von minimalen bis maximalen verteilten Eingaben, Grauwerte gemessen. Für besonders helle und dunkle Ausgaben wird je ein weiterer Wert für a eingeschoben. Anschließend werden alle Kombinationen von a und b erzeugt und beobachtet. Die Ergebnisse bilden eine 13×11 -Matrix. Der erste Wert jeder Reihe entspricht $add(a, 0)$, der erste Wert jeder Spalte $add(0, b)$.

Der beschriebene Algorithmus sucht nun nicht mehr vier Nachbarn, sondern bestimmt die beiden benachbarten Reihen y_1, y_2 der Matrix, deren jeweils erste Werte unter bzw. über a liegen, also a einschließen. Analog werden zwei Spalten x_1, x_2 für b bestimmt. Die vier Matrixeinträge $an(x_1, y_1), (x_2, y_1), (x_1, y_2), (x_2, y_2)$ sind die vier Nachbarn, ihre Werte v_1, v_2, v_3, v_4 . Zunächst werden die Abstände d_1, d_2 über $d_1 = |b - (x_1, 0)|, d_2 = |b - (x_2, 0)|$ ermittelt. Somit lassen sich aus den Reihen y_1, y_2 zwei Zwischenergebnisse gewinnen:

$$r_1 = \frac{\frac{v_1 + v_2}{d_1 + d_2}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}}, r_2 = \frac{\frac{v_3 + v_4}{d_1 + d_2}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}}$$

Mit den Gewichten $d_3 = |a - (0, y_1)|, d_4 = |a - (0, y_2)|$ ist schließlich das Resultat bestimmt:

$$r = \frac{\frac{r_1}{d_3} + \frac{r_2}{d_4}}{\frac{1}{d_3} + \frac{1}{d_4}}$$

Das Ergebnis des Kartenalgorithmus lässt sich grafisch veranschaulichen. Auf einem 101×101 Pixel großes Feld repräsentiert die Reihenummer die Luminanz l_a des Projektors a im betrachteten Bereich. Die Spaltennummer repräsentiert analog die Luminanz l_b des Projektors b . Der Ursprung des Systems ist die Ecke links oben. Das Feld lässt sich nun Anhand der Ausgabe $r_{a,b} = map(l_a, l_b)$ färben. $r_{a,b} < 1$ und $99,5 < r_{a,b} < 100,5$ werden schwarz gefärbt. Andere Ausgaben werden in Gruppen $[i * 5, \dots i * 5 + 5[$ geclustert. Jedem Cluster wird eine Farbe zugeteilt. Abbildung 26 zeigen das Prinzip. $r_{a,b} < 1$ ist schwarz, der Bereich zwischen

99,5 und 100,5 ebenfalls. Dies sind der schwarze Bereich links oben bzw. der schwarze „Kreisbogen“. Dazwischen ist die Entwicklung der Resultate anhand der sich ändernden Färbungen charakterisiert.

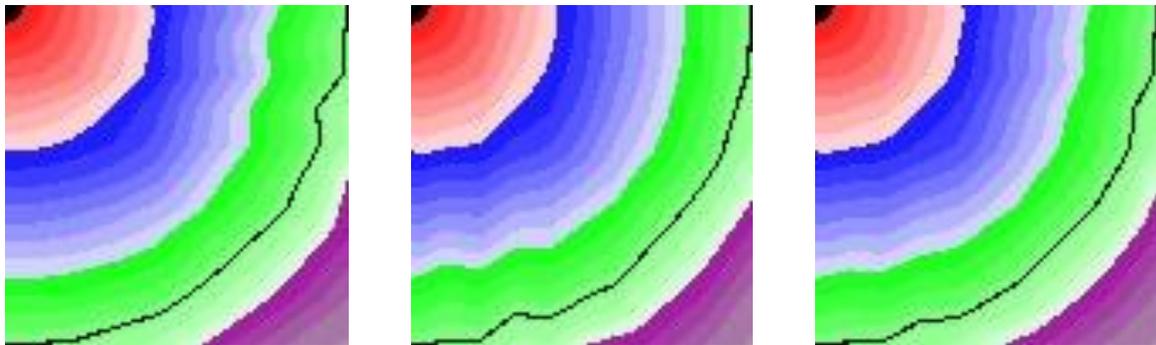


Abbildung 26

Veranschaulichung der zweistelligen Funktion $map(a, b)$ und Variationen. Ursprung: links oben. Färbung nach Eingabe der Koordinaten die Funktion ($map(x, y)$). Schwarze Linie: $map(x, y) = 100$.

Links: $map(l_a, l_b)$

Mitte: $map(l_b, l_a)$

Rechts: $\frac{map(l_a, l_b) + map(l_b, l_a)}{2}$

Abbildung 26 (Links und Mitte) basieren auf Anwendung des Algorithmus und die Anwendung mit verdrehten Eingabeparametern. Die Abbildungen zeigen Abweichungen von der anzunehmenden Kommutativität. Zudem fällt für Kombinationen $l_b > l_a$ ein Verlust des regelmäßigen Charakters auf, aus Kreisbögen werden Wellen. Die Ursache ist bei der Größe des betroffenen Bereichs nicht auf einzelne Messfehler zurückzuführen. Es wird eine Anomalie bei einem an der Messungen beteiligten Projektoren angenommen. Die Auswirkung legt eine Abweichung für eine Bandbreite von höherem oder niedrigerem Input von der Ausgabe der anderen Projektoren nahe. Abbildung 26 (Rechts) charakterisiert das gemittelte Ergebnis der Anwendung mit normaler und verdrehter Variablenbelegung. Damit ist die anzunehmende Kommutativität erreicht und die Amplitude der Wellen verkleinert, jedoch die Verbreitung der Wellen vergrößert worden. Die in der praktischen Anwendung höhere Güte erreicht deshalb eine Modifikation, die für $l_a \geq l_b$ $map(l_a, l_b)$ und andernfalls $map(l_b, l_a)$ wiedergibt. Abbildung 27 charakterisiert diese Variante.

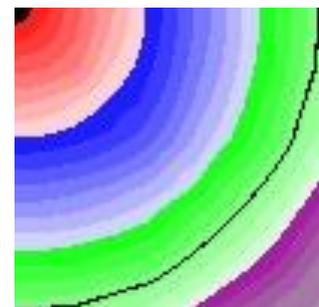


Abbildung 27

Selektive Variante von $map(l_a, l_b)$, Färbung nach Abbildung 26.

3.1.3.2. Summe 100

Aus der Implementierung kommt der Bedarf an einer Funktion, die zu einer Eingabe a den Wert b ermittelt, für den $map(l_a, l_b)$ 100 wiedergibt. Der entsprechende Algorithmus wird

ähnlich aufgebaut wie $map(a, b)$. Es werden zunächst die Reihen y_1, y_2 gesucht, deren Werten $(0, y_1), (0, y_2)$ die Eingabe a einschließen. Anschließend werden für y_1, y_2 Spalten x_1, x_2 gesucht, so dass der Wert an (x_1, y_1) bzw. (x_2, y_2) der erste der Reihe ist, der mindestens 100 erreicht. Diese Werte sind v_{11}, v_{21} . Die Werte der Felder an $(x_1 - 1, y_1)$ bzw. $(x_2 - 1, y_2)$ sind v_{12}, v_{22} . Mittels

$$r_1 = \frac{\frac{(x_1, y_1)}{|v_{11} - 100|} + \frac{(x_1 - 1, y_1)}{|v_{12} - 100|}}{\frac{1}{|v_{11} - 100|} + \frac{1}{|v_{12} - 100|}}, r_2 = \frac{\frac{(x_2, y_2)}{|v_{21} - 100|} + \frac{(x_2 - 1, y_2)}{|v_{22} - 100|}}{\frac{1}{|v_{21} - 100|} + \frac{1}{|v_{22} - 100|}}$$

lassen sich zwei Zwischenergebnisse ermitteln, die gewichtet zum Ergebnis führen. Die Distanzen sind $d_1 = |a - (0, y_1)|$ und $d_2 = |a - (0, y_2)|$. Somit ist das Resultat

$$b = \frac{\frac{r_1}{d_1} + \frac{r_2}{d_2}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}}$$

Allerdings wurde in 3.1.3.1 festgelegt, dass nur der Teil der Wissensbasis zur Anwendung kommt, bei der $a \leq b$ gilt. Ist nun das Resultat b größer der Eingabe a , wird der Algorithmus mit vertauschten Rollen von Reihen und Spalten wiederholt. Abbildung 28 zeigt die Folgen, wenn diese Erweiterung nicht implementiert wird, jedoch bereits zwischen dem ursprünglichen Ergebnis und dem Ergebnis vertauschter Rollen von Spalten und Reihen gemittelt wird. Die zugrunde liegende Funktion ist offensichtlich nicht glatt und schon gar nicht monoton fallend (antiton). Die fehlende Monotonität macht das Ergebnis für den Zweck nur noch eingeschränkt nutzbar.

Abbildung 29 zeigt den Verlauf der Wiedergabe für Eingaben zwischen 0 und 100 mit Beschränkung auf die Wissensbasis $a \leq b$. Dieser Algorithmus wird mit $sum100(a)$ bezeichnet. In der Implementierung des Algorithmus wird das Ziel 100 zudem parametrisiert. Somit ist die Abfrage des Inputs eines Projektors b möglich, um mit gegebenem Input eines Projektors a in der Überlagerung zum gewünschten Ergebnis c zu kommen. Die Implementierung wird mit $sum(a, c)$ bezeichnet. Im Idealfall gilt für alle $a \in \{x | 0 \leq x \leq 100\}$ $a = sum100(sum100(a))$. Abbildung 30 (Links) zeigt die Abweichung für alle a gegenüber $sum100(sum100(a))$ für den angegebenen Wertebereich in Prozent. Abbildung 30 (Rechts) veranschaulicht die absoluten Abweichungen. Für $a > 20$ gibt es praktisch keine Abweichung. Im Bereich $a \leq 20$ wirkt sie in den Graphen relevant stark, ist jedoch praktisch nahezu vernachlässigbar. Die Funktion zwischen Projektor-Input und dem, was auf dem Display zu sehen ist, ist für dunkle Inhalte verengt. Die Darstellung von Input mit Luminanz 1% unterscheidet sich kaum von Input mit 3%. Erst für Input mit größerem Input kommt der

Zusammenhang in die Nähe eines linearen Charakters. Auch wenn in Abbildung 24 der Einfluss der Kamera ebenfalls einfließt, lässt sich diese Annahme auch an diesem Graph doch erahnen. Aufgrund dieses praktischen Bezugs werden $sum100(a)$ und $sum(a, c)$ ohne Modifikation verwendet.

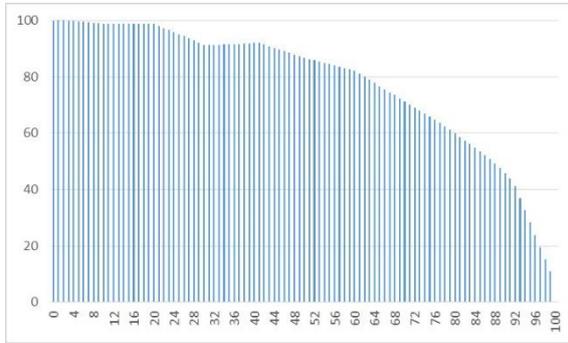


Abbildung 28

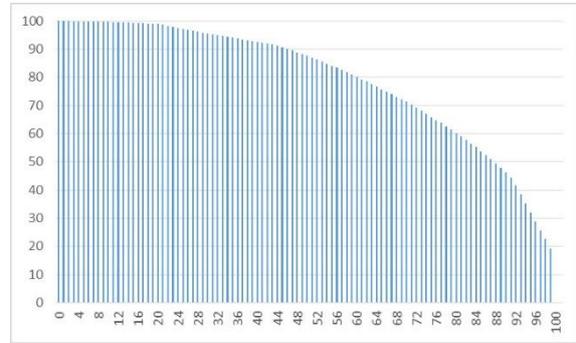


Abbildung 29

$sum100(a)$ mit Ausnutzung der vollen Wissensbasis.
x-Achse: a, y-Achse $sum100(a)$

$sum100(a)$ mit Ausnutzung der „guten“ Hälfte der Wissensbasis.

x-Achse: a, y-Achse $sum100(a)$

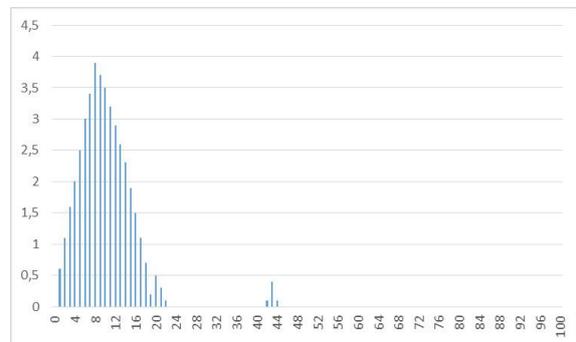
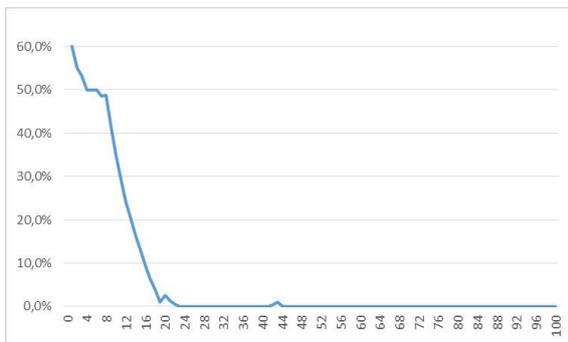


Abbildung 30

Abweichung von der Annahme: $a = sum100(sum100(a))$, in Abhängigkeit von a

Links: relativ

Rechts: absolut

3.1.1. Vorbehandlung überlagerter Bereiche

[6] verwendet zur Vorbehandlung überlagerter Bereiche des Displays einen linearen Verlauf. Dieser dimmt die Wiedergabe zu den Projektorfeld-Rändern hin aus, wenn diese unter einem überlappenden Bereich liegen. Abbildung 31 zeigt die Situation anhand eines 2-Projektor-Systems. Die Felder der beiden Projektoren überlappen, es entsteht ein gemeinsames Feld. Die Luminanz-Anpassung dieses Felds ist nicht trivial. Rekonstruieren lässt sich das Feld durch $map(l_a, l_b)$, siehe 3.1.3. Allerdings besitzt die Rekonstruktion aufgrund zu geringer Auflösung der erfassenden Einheit keine pixelgenaue Präzision. Umso „schärfer“ der Übergang zur höheren Luminanz im gemeinsame Feld, umso stärker wird sich die fehlende Präzision auswirken.

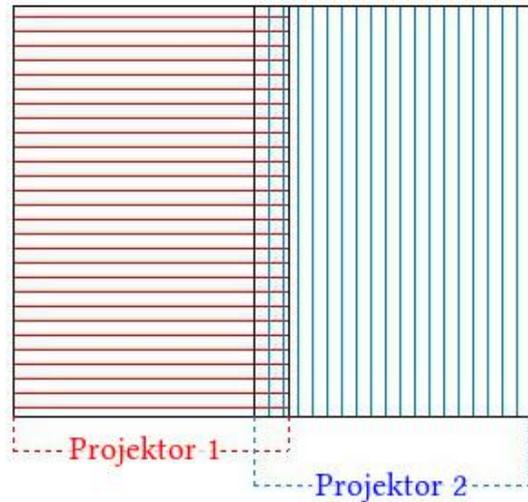


Abbildung 31

Skizzierte Situation überlagerter Projektorbereiche.

Abbildung 32 veranschaulicht gleich zwei Probleme. Nach Korrektur des Multi-Projektor-Systems ohne Vorbehandlung finden sich an den überlappenden Bereichen dunkle und helle Streifen. Diese resultieren daraus, dass die Position der beiden Projektorfelder nicht exakt genug ermittelt wurde. Das rechte Feld liegt weiter links als angenommen (bzw. das linke Feld weiter links). Somit findet die Korrektur des deutlich helleren Bereichs nicht in den richtigen Abschnitten statt. Das Resultat ist der helle Streifen am linken Rand des überlappenden Bereichs und der dunkle Streifen rechts an diesen Bereich anschließend. Das zweite offensichtliche Problem ist, dass sich die Projektoren keine zeitliche Stabilität besitzen, siehe 2.1.2.3. Im Gegensatz zur Feststellung in [4], scheint die Chromatizität jedoch stärker betroffen. Möglicherweise sind andere Gründe ursächlich, es bleibt jedoch der Eindruck einer anderen Tönung. Diese kann mit weichen Übergängen besser verschleiert werden.

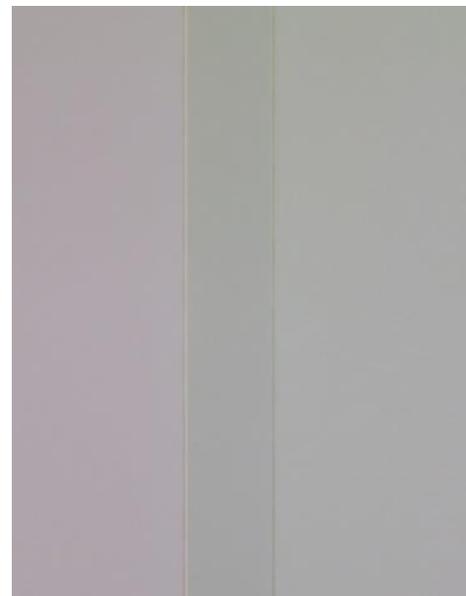


Abbildung 32

Auswirkung der nicht pixelgenauen Rekonstruktion des Luminanz-Surfaces des Displays und der Lage der Projektoren.

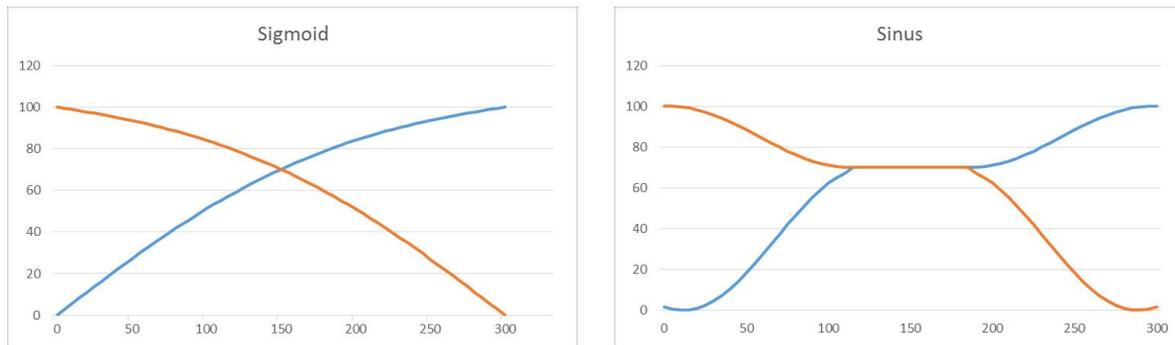


Abbildung 33

Links: Sigmoid $f(x) = \frac{221}{1+e^{-\frac{x}{100}-0.5}}$ (blau) und an $x = 149.5$ gespiegelte Abbildung (orange)

Rechts: analoges Prinzip mit $f(x) =$

$$x < 113: f(x) = 35 * \sin\left(\frac{x}{36} - \frac{\pi}{2}\right) + 30$$

$$113 \leq x < 187: f(x) = 70$$

$$x \geq 187: f(x) = 15 * \sin\left(\frac{x}{35} - \frac{\pi}{5}\right) + 85$$

Der einfachste Ansatz ist – und diesen verfolgt auch [6] – die Projektorfelder unter überlagerten Bereichen linear auszublenden. Aus dem „scharfen“ Übergang wird ein fließender. Diese gemeinsamen Felder würden sich aber bereits in einem ersten Schritt in die Nähe homogener Wiedergabe bringen lassen, könnte man dem Gradienten des einen Projektors etwas entgegen stellen, das sich in diesem Sinne ergänzt. Abbildung 29 macht schon deutlich, dass dies mit zwei linearen Verläufen nicht zu bewerkstelligen ist. Versuche mit anderen Funktionen, seien es bspw. Sinus-Kurven, Sigmoide⁸ und Modifikationen dieser Funktionen, bringen partiell gute Resultate, jedoch nicht über die gesamte Fläche überlappender Flächen und erst recht nicht als „Allheilmittel“ für alle überlappenden Flächen. Abbildung 33 zeigt links eine Sigmoid-Funktion über 300 Pixel und die an $x = 149.5$ gespiegelte Funktion. Zusammen ergibt sich, wie erwähnt noch kein Eindruck, der zufriedenstellend ist. Rechts wird die stückweise Definition einer Abbildung mittels konstantem Bereich und zwei Sinus-Funktionen, sowie die an $x = 149.5$ gespiegelte Funktion gezeigt. Der konstante Bereich fußt auf der Beobachtung, dass Luminanz 70% überlagert mit Luminanz 70% ungefähr dem Eindruck von Luminanz 100% eines einzelnen Projektors entspricht. Die Bereiche neben dem konstanten Abschnitt sehen jedoch ebenfalls nicht zufriedenstellend aus. Der Fehler ist offensichtlich. Es ist unwahrscheinlich, dass die Summe einer Funktion und der gespiegelten Funktion für jede Eingabe in die Nähe dessen kommt was, auf dem Display homogen erscheint. In diesem Abschnitt wird ein überlappender Bereich von Breite ca. 300 Pixel angenommen. Dies entspricht der am Multi-Projektor-System der Universität vorgefundenen Situation.

⁸ $sig(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$

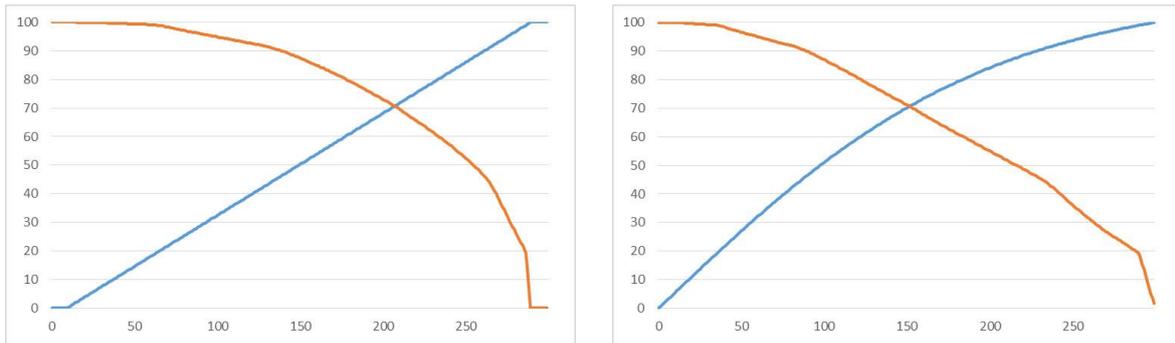


Abbildung 34

Links: Linearer Verlauf (blau) und resultierende Ergänzungsfunktion f^* (orange)

Rechts: Sigmoid aus (blau) und resultierende Ergänzungsfunktion f^* (orange)

Mit dem in 3.1.3.2 erarbeiteten Algorithmus $sum100(a)$ lässt sich die Vorbehandlung zielgerichteter angehen. Grundsätzlich wird ein homogenerer Eindruck gewonnen, wenn überlapende Bereiche fließend gestaltet werden. Während die Eingabe des einen Projektors gedimmt wird, steigt der Input des jeweils überlagerten Pixels entsprechend an. Das Grundprinzip ist in Abbildung 33 anschaulich, nur ist die damit erzielte Ausgabe ausbaufähig. Der einfachste Ansatz ist, für einen Projektor eine lineare Funktion $f(x)$ anzunehmen und die Funktion $f^*(x)$ so zu definieren, dass gilt $\forall x_i \in [0 \dots 300]: sum100(f(x_i)) = f^*(x_i)$. Abbildung 34 (links) zeigt das Diagramm der beiden Funktionen. Noch problematisch ist, dass sich die von den beiden Funktionen erzeugten Gradienten unterscheiden. Während die eine Funktion für den Input einen linearen Gradienten erzeugt, wird von der anderen zunächst überproportional schnell höherer Input erreicht, welcher dann Richtung maximalem Input ausläuft. Theoretisch ist dies kein Problem, praktisch zeigten sich gleichmäßigere Verläufe jedoch robuster gegenüber ungenau ausgerichtete Projektoren. Durch Verschiebung auftretende Fehler zeigen weniger starke Ausschläge, da die Funktionen durchgehend glatter sind. Ein gleichmäßigerer Verlauf wird erreicht, wenn auf das Sigmoid aus Abbildung 33 zurück gegriffen wird und die entsprechende Ergänzungsfunktion f^* mittels $f^*(x) = sum100(f(x_i))$ definiert wird. Abbildung 34 (rechts) veranschaulicht diese Funktionen.

Die Anwendung dieser Funktion erreicht bereits, dass die in Abbildung 35 gezeigten Ausgangslage durch die Situation in Abbildung 36 abgelöst wird. Übergänge sind immer noch erkennbar, allerdings sind diese nun nicht mehr „scharf“, sondern verlaufen über eine größere Fläche. Der Eindruck des homogenen Displays wird nun vor allem durch die unterschiedlichen Farbstiche der Projektoren gestört. Ungeachtet dessen, wurde der überlappend wahrgenommene Bereich verkleinert. Das Verfahren löst die Luminanz-Anpassung des überlappenden Bereichs so gut, dass der homogene Eindruck durch die weitere Korrektur nicht verbessert wird, sogar leidet. Daraus ergibt sich die Überlegung, die überlappenden Bereiche allein

durch ein modifiziertes Verfahren zu behandeln und bei weiteren Korrekturen auszulassen, siehe 4.1.6.1.



Abbildung 35

Keine Vorbehandlung, flächig maximaler Input aller Projektoren

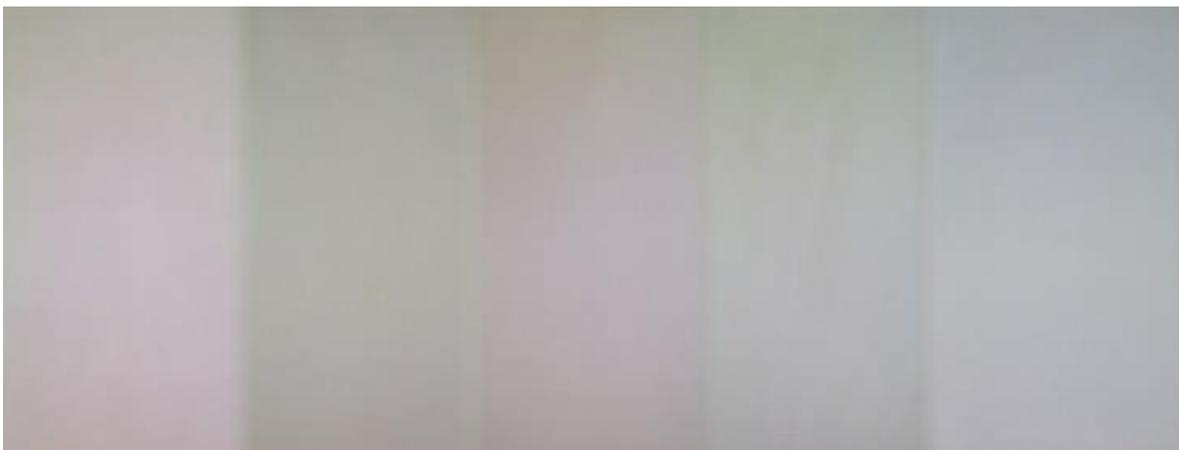


Abbildung 36

Vorbehandlung mit den in Abbildung 34 (rechts) gezeigten Funktionen, flächig maximaler Input aller Projektoren

3.1.2. Randbereich

Wie in 2.3.2 erwähnt, ignoriert [6] einen äußeren Rand des zusammengesetzten Displays. Dass dies durchaus begründet ist, zeigt ein Beispiel. Abbildung 37 (links) zeigt die Analyse eines Display Luminanz-Surfaces. Nach Bestimmung der allgemein erreichbaren Wiedergabe – wobei hier bereits zur Toleranzerhöhung die dunkelsten 0,1% der Pixel ausgeschlossen wurden – lässt sich das Luminanz-Surface in Bereiche einteilen, die geringere, höhere oder die selbe Luminanz als die allgemein erreichbare Wiedergabe aufweisen. Diese Bereiche sind grün (höher), rot (geringer) oder weiß (gleich) gefärbt. Die Korrektur könnte also gemäßiger ausfallen, wäre die Ecke links-oben nicht relevant. Es reicht schon ein geschlossener Rand

von ca. 5% der Höhe des Displays um bei sonst identischer Auswertung zu einer relevant höheren allgemein erreichbaren Wiedergabe zu gelangen. Der neue Wert ist ca. 9% höher als zuvor. Abbildung 37 (rechts) verdeutlicht, dass dies die Korrektur mittels LAM nicht behindert, nur im Eck links-oben ist eine Fläche dunkler als die allgemein erreichbare Wiedergabe. Dem Betrachter des gesamten Displays wird dies, wenn überhaupt, nur bei monotonen Motiven auffallen.

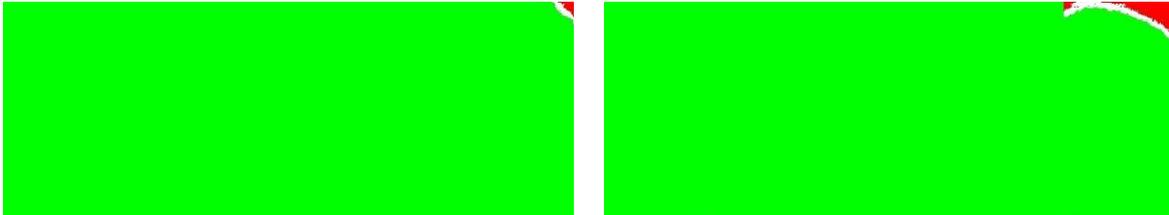


Abbildung 37

Grün: Heller als allgemein erreichbare Wiedergabe

Weiß: Allgemein erreichbare Wiedergabe

Rot: Dunkler als allgemein erreichbare Wiedergabe (0,1% Toleranzbereich)

Links: Situation bei Suche nach allgemein erreichbarer Wiedergabe über gesamtes Surface

Rechts: Situation beim Ignorieren eines Rands in Dicke von 5% der Höhe.

3.1.3. Korrelation der Projektoren



Abbildung 38

Displayfläche von drei Projektoren. Der mittlere mit flächig maximalem Input, die beiden anderen mit Input 0.

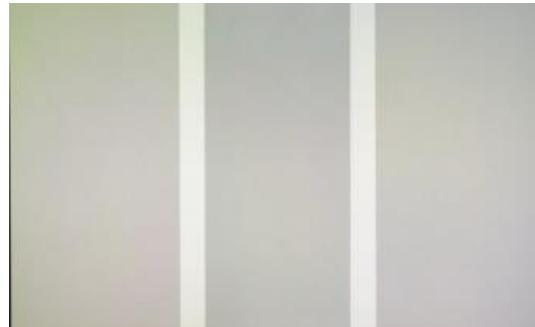


Abbildung 39

Selbe Fläche wie in Abbildung 38, alle Projektoren mit flächig maximalem Input

Der Wirkungsbereich von Projektoren endet augenscheinlich nicht an den Grenzen der zuge teilten Displayfläche. Am Multi-Projektor-System der Universität Stuttgart lässt sich dies nachvollziehen, der Einfluss von Streulicht und Reflexionen sichtbar machen. Hierzu wird eine Aufnahme bei flächig maximalem Input eines Projektors und gleichzeitig flächig minimalem Input aller anderen Projektoren erstellt. Anschließend wird eine weitere Aufnahme erstellt, wobei auch die Projektoren neben dem, der bereits mit maximalen Input betrieben wird, ebenfalls mit flächig maximalen Input versehen werden. Abbildung 38 und Abbildung

39 zeigen je den Ausschnitt aus den beiden Aufnahmen, der die Bereiche der drei Projektoren auf dem Display entspricht.

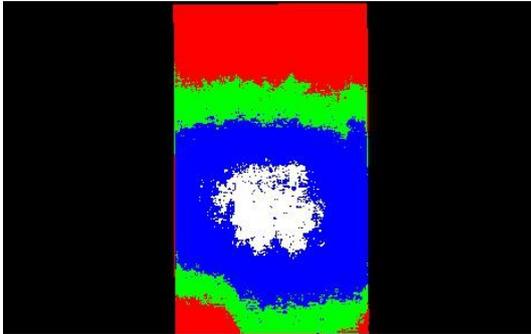


Abbildung 40

Luminanz-Situation von Abbildung 38

Kolorierung: Luminanz ...

< 60% → Schwarz

< 72% → Rot

< 75% → Grün

< 78% → Blau

≥ 78% → Weiß

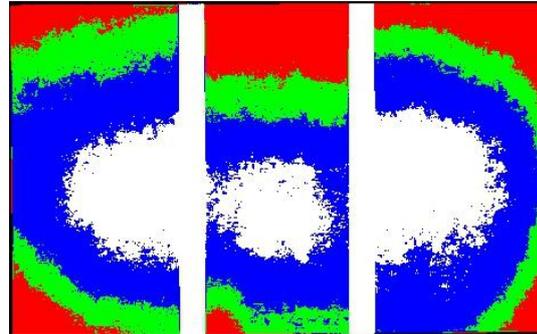


Abbildung 41

Luminanz-Situation von Abbildung 39

Kolorierung: Siehe Abbildung 40

Die Aufnahmen der beiden Szenarien wurden so eingefärbt, dass Bildpixel mit Luminanz kleiner 60% schwarz, kleiner 72% rot, kleiner 75% grün, kleiner 78% blau und ab 78% weiß abgebildet werden. Abbildung 40 zeigt das Resultat des ersten Szenarios, Abbildung 41 das Resultat das zweiten Szenarios. In beiden Abbildungen ist das Bild auf die Fläche der drei Projektoren beschnitten. In den überlagerten Bereichen steigt die Luminanz selbstverständlich sprunghaft an. Zudem fällt der vergrößerte Hotspot im Zentrum des Displaybereichs des mittleren Projektors auf. Abgesehen davon, behält die Kolorierung ihre (relativ grob definierte) Charakteristik bei. Interessant ist außerdem der Blick auf die Charakteristik der linken und rechten Projektorfläche. Die symmetrischen Helligkeitsunterschiede der Projektordarstellung (siehe 2.1.2.3) verloren dadurch, dass je nur eine anliegende Projektorfläche maximal bestrahlt wurde, die horizontale Symmetrie. Eine anders definierte Kolorierung kann das Bild durchaus anders wirken lassen. Die gewählte Kolorierung deckt sich jedoch gut mit dem visuellen Eindruck des menschlichen Betrachters.

Abbildung 42 zeigt wieder die erste Szene, jedoch mit anderer Kolorierung. Pixel mit Luminanz kleiner 2% sind schwarz, kleiner 4% rot, kleiner 6% grün, kleiner 8% blau und darüber weiß.

Die größten Korrelationen finden sich direkt an den Bereichen anliegend, in denen die Abbildungen zweier Projektoren überlagern werden. Luminanzen zwischen 4 und 6% finden sich jedoch noch im ersten Viertel des anliegenden Felds. Einen zumindest geringen Einfluss findet sich fast über die kompletten Bereiche benachbarter Projektoren.

Der Einfluss eines Projektors mit flächig maximalem Input ist unstrittig. Trotzdem bleibt abzuwägen, ob dieser Einfluss in die Erstellung der LAMs eingeht. Der Einfluss ist dann signifikant, wenn von einem Projektor besonders helle Inhalte dargestellt werden, von den umliegenden dagegen besonders dunkle. Wenn in der Hauptsache helle, monotone Inhalte projiziert werden, ist die Beachtung des Einflusses in der Korrektur angebracht. Wenn jedoch beliebige Inhalte projiziert werden, kann bei der Generierung einer LAM nur stochastisch darauf geschlossen werden, welchen Einflüssen ein Displaypixel ausgesetzt sein wird. Darum wird beim Verfahren zur Generierung der LAMs (siehe 3.2.2) dieser Einfluss ignoriert. Das Worst-Case Szenario dieser Entscheidung entspricht Abbildung 38. Ohne die Korrektur wird die Evaluierung der Korrektur anhand monotoner Flächen schlechter ausfallen. Das soll bei der Interpretation beachtet werden.

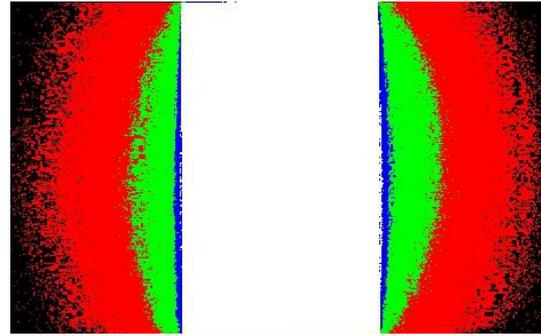


Abbildung 42

Luminanz-Situation von Abbildung 38

Kolorierung: Luminanz ...

< 2% → Schwarz

< 4% → Rot

< 6% → Grün

< 8% → Blau

≥ 8% → Weiß

3.1.4. Zielsetzung der Korrektur

[6] visiert mit der Luminanz-Korrektur die Homogenität des gesamten Displays des Multi-Projektor-Systems an. Abbildung 6 zeigt die Kehrseite dieser Priorisierung: Dargestellte Inhalte sind deutlich dunkler, der von den Projektoren zur Verfügung gestellte Dynamikbereich wird nicht ausgenutzt. Abbildung 43 zeigt die von Abbildung 40 und Abbildung 41 bekannte Kolorierung einer Aufnahme des Displays bei flächig maximalem Input aller Projektoren. Zu-

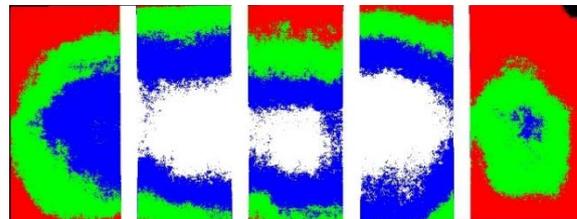


Abbildung 43

Maximaler Input aller Projektoren. Luminanz-Situation grafisch aufbereitet.

Kolorierung: Siehe Abbildung 40

nächst fällt wieder die Korrelation benachbarter Projektoren auf. Abgesehen davon ist der Projektor ganz rechts relevant dunkler, als der ganz links. Da die Charakteristik des mittleren Projektors bereits aus Abbildung 40 bekannt ist, kann geschlossen werden, dass dieser heller ist, wie die beiden am Rand. Zudem fällt wieder der aus 0 bekannte besonders dunkle Bereich rechts oben auf. Eine Korrektur nach [6] wird alle Pixel jedes Projektors auf den dunkelsten Punkt des Luminanz-Surface hin dimmen. Auch wenn ein Randbereich bei der Generierung der LAMs ignoriert wird, bleibt der Unterschied zwischen hellen und dunklen Bereichen eklatant. Hier stellt sich die Frage nach der Priorisierung. Soll höchst-mögliche Uniformität erzeugt werden oder wird die Uniformität aufgeweicht zugunsten besserer Nutzung des Dyna-

mikrobereichs der Projektoren. Möglicherweise fällt dem menschlichen Betrachter die geringere Uniformität gar nicht in besonderem Maße auf, womit lokal bestimmte Korrekturen möglich werden.

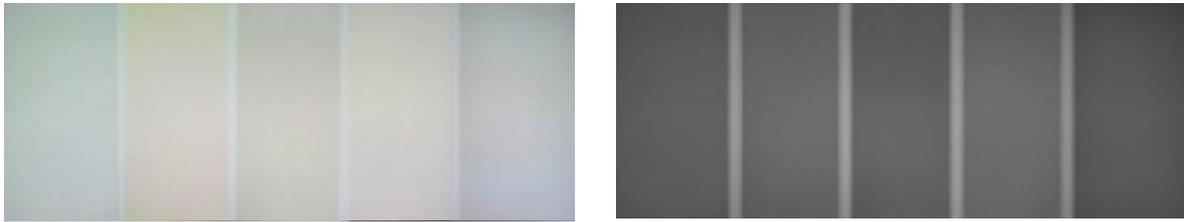


Abbildung 44

Links: Aufnahme des Displays

Rechts: Rekonstruktion derselben Situation aus Einzelaufnahmen der Projektoren

Abbildung 44 (Links) zeigt eine Aufnahme des Displays des Multi-Projektor-Systems der Universität Stuttgart bei flächig maximalem Input, jedoch mit Vorbehandlung der überlappenden Bereiche (entspricht nicht dem in 3.1.1 gezeigten Sigmoid mit Ergänzungsfunktion f^* , sondern einem einfacheren Verlauf). Das aus Einzelaufnahmen, bei denen je nur ein Projektor mit flächig maximalen Input betrieben wurde, rekonstruierte Luminanz-Surface des Displays, ist in Abbildung 44 (Rechts) zu sehen. Das Bild ist dunkler als Abbildung 44 (Links). Dies ist dadurch bedingt, dass die Luminanz in der Implementierung zur Basis 100 repräsentiert wird. Somit ist die Darstellung einer monochromen Bilds, die das Luminanz-Surface repräsentiert und pro Pixel 256 Helligkeitsstufen besitzt, entsprechend dunkler. Die Verteilung der 100% Luminanz auf die 256 Helligkeitsstufen ist nicht möglich, da in den überlappenden Bereichen durch die Addition von literarisierten Werten (siehe 3.1.2) Luminanz größer 100 (Prozent) möglich sind. Zur Erinnerung diese Werte haben keine absolute Aussagekraft, sondern geben nur an, welcher Input des Projektors zur per definierter Aufnahme mittels Kamera ermittelten Luminanz geführt hat.

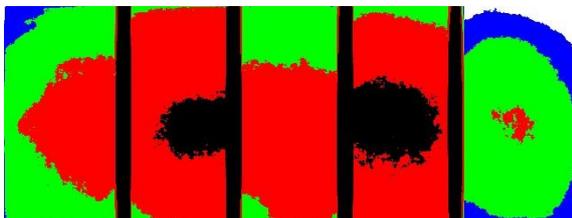


Abbildung 45

Aufbereitete Darstellung der global korrigierenden LAM.

Kolorierung: Siehe Abbildung 40.



Abbildung 46

Hotspots besonders stark korrigierter Bereiche der global korrigierenden LAM

Abbildung 46 zeigt die Charakteristik der aus dem Luminanz-Surface (Abbildung 44, rechts) erzeugten LAM. Schwarze Pixel repräsentieren Bereiche, die keine Korrektur bedingen (also

Faktor 100%). Umso heller das Rot umso größer die Korrektur (also Faktor umso weiter Richtung 0%). Abbildung 45 zeigt eine andere Sicht auf die erzeugte LAM. Mit der Kolorierung lässt sich erkennen, in welchen Bereichen flächig in welcher Höhe etwa zu korrigieren ist. Hier lässt sich die zuvor geäußerte Kritik belegen, dass Aufgrund der Situation in kleinen, an den äußeren Bereichen positionierten Feldern, auf dem restlichen Display stärker reduziert wird. Hier fallen nicht nur das linke und rechte Ende des Displays auf, auch liegen zum oberen und unteren Rand fast durchgehende Bereiche, die dunkler als das restliche Feld sind – also weniger stark korrigiert werden. Somit wird eine Korrektur lohnend, die nicht nur das große Problemfeld im rechten Projektorfeld (siehe Abbildung 37 (links)) global weniger gewichtet, sondern so lokal operiert, dass der obere und untere Helligkeitsabfall zur Mitte hin „ausgeschlichen“ wird.

Der erstellten LAM fehlt noch die Zusammenführung mit der vorgenommenen Vorbehandlung überlappender Bereiche. Dies soll an dieser Stelle jedoch zurück gestellt werden und die vorkorrigierte Situation aus Abbildung 44 (Links) als die „ursprüngliche“ Situation des Displays angenommen werden. Die erzeugte LAM wird nach dem Algorithmus aus [6] nun in Projektor-LAMs mittels

$$A_{P_i}(x_{P_i}, y_{P_i}) = A_d(T_{P_i \rightarrow D}(x_{P_i}, y_{P_i}))$$

überführt werden, siehe 2.3.1.1.3. Das sichtbare Resultat auf dem Display lässt jedoch bereits simulieren, indem die Display-LAM auf das gesamte anzuzeigende Bild angewendet wird. Zur Veranschaulichung wird ein flächig weißes Bild und die Fotografie aus Abbildung 47 auf diese Weise simuliert.

Abbildung 48 zeigt das korrigierte Foto, Abbildung 49 die korrigierte weiße Fläche. Augenscheinlich fällt die Änderung in Abbildung 48, abgesehen von den Bereichen überlagerter Projektion, nicht auf. Nur der intensive Vergleich zeigt die Veränderung im Bild. In Abbildung 49 hingegen ist die Korrektur nicht zu übersehen. Die unterschiedliche Wahrnehmung derselben Korrektur hat zwei Gründe: (1) Das Foto weist von sich schon diverse Helligkeitsunterschiede auf. Die Korrektur „versteckt“ sich darin. (2) Es wird prozentual korrigiert. Eine Korrektur auf 90% ist absolut betrachtet größer, wenn der zu korrigierende Wert höher liegt. Eine weiße Fläche bietet somit die (absolut) höchsten Dimmungen.



Abbildung 47

*Aufnahme unkorrigiert
Photo: Rainer Sturm / pixelio.de*



Abbildung 48

Simulierte globale Korrektur von Abbildung 47



Abbildung 49

Simulierte globale Korrektur einer weißen Fläche

3.1.4.1. Lokale LAM



Abbildung 50

Links: Lokal erreichbare Wiedergabe in Feldern.

Rechts: Dasselbe Bild mit der Feldgröße weichgezeichnet.

Lokal bestimmte LAMs können erzeugt werden, indem das Luminanz-Surface des Displays in Felder zerlegt wird, in deren Grenzen jeweils die lokal erreichbare Wiedergabe bestimmt wird. Dabei sind zwei Parameter zu setzen, um die Einteilung in x- und y-Richtung zu bestimmen. Abbildung 50 (links) verdeutlicht die Idee mit einer beispielhaften Definition von 15 Feldern in x- und 6 in y-Richtung. Die Zentren der Felder sind gleichmäßig verteilt. Auf den Grenzen des Displays und insbesondere auf den Ecken liegen ebenfalls Zentren. Deshalb sind in Abbildung 50 (links) kleinere Felder am Rand auszumachen. Der Rest dieser Felder liegt außerhalb des Displays. Die 5 Felder in y-Richtung sind deshalb eigentlich 4 große und 2 kleine Felder, vertikal sind es 14 große und 2 kleine Felder. Bei einem ersten naiven Ansatz entspricht die Luminanz der Felder der lokal erreichbaren Wiedergabe. Bei der Generierung der LAMs ist nun nicht mehr die allgemein erreichbare Wiedergabe Grundlage, sondern die Luminanz des korrespondierenden Pixels in Abbildung 50 (links).

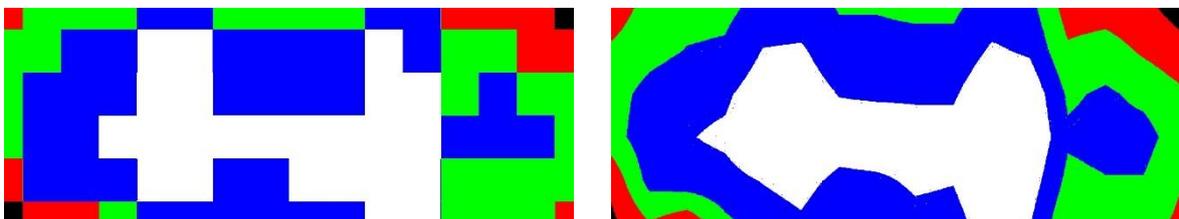


Abbildung 51

Graphische Aufbereitung der lokal erreichbaren Wiedergabe (Abbildung 50), Kolorierung nach Luminanz:

< 65% → Schwarz

< 75% → Rot

< 85% → Grün

< 95% → Blau

≥ 95% → Weiß

Ein Nachteil der Methode ist offensichtlich, in monotonen Bereichen des korrigierten Bilds werden die Kanten der Felder sichtbar sein. Die Übergänge zwischen den Bereichen unter-

schiedlicher Felder müssen zumindest geglättet werden. Einfach ist das durch das Weichzeichnen des Bilds, mit einem Radius der Feldgröße angepasst, zu erreichen. Abbildung 50 (rechts) zeigt Abbildung 50 (links) weichgezeichnet mit dem Radius der Feldgröße.

Abbildung 51 zeigt grob die lokal erreichbare Wiedergabe aus Abbildung 50. Die Kolorierung zeigt deutlich, wo der Vorteil dieser Methoden liegt: Die Dynamik der Projektoren wird in großen Bereichen des Displays besser ausgenutzt. Das korrigierte Bild bleibt im Mittel heller. Die aus Abbildung 44 (Rechts) zunächst gewonnene LAM (Charakterisierung in Abbildung 45, Abbildung 46) wurde mit einer allgemein erreichbaren Wiedergabe von 69% generiert. Das im Stile von Abbildung 51 kolorierte Bild, wäre also flächig Rot. Abbildung 52 zeigt die Charakteristik der neu generierten LAM aus dem bereits verwendeten Luminanz-Surface. Der Vergleich mit der Charakteristik, der mit der allgemein erreichbaren Wiedergabe erzeugten LAM (Abbildung 45) zeigt eine relevante Verbesserung, was die Ausnutzung der Dynamik der Projektoren betrifft. Dies bestätigt auch der Vergleich von Abbildung 46 und Abbildung 53.

Die Entfernung der „scharfen“ Kanten, der in Felder bestimmten lokalen Wiedergabe per Weichzeichner war ein schneller, naiver Ansatz. Zudem wurden bisher nur lokal bestimmte Wiedergaben einbezogen und die allgemein erreichbare Wiedergabe außer Acht gelassen. Eine parametrisierbare Gewichtung der Kombination der lokal erreichbaren Wiedergaben und der allgemein erreichbaren Wiedergabe, gibt jedoch die Möglichkeit, den für den Betrachter des Displays besten Kompromiss aus Uniformität und Helligkeit der Darstellung zu finden.

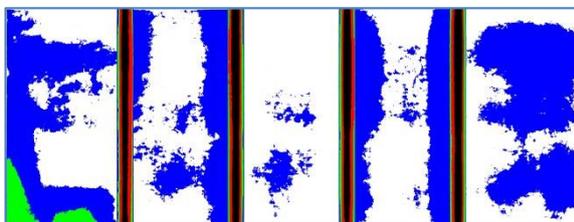


Abbildung 52

*Aufbereitete Darstellung der lokal korrigierenden LAM, nach einfachem Verfahren (Weichzeichnung)
Kolorierung: Siehe Abbildung 40*



Abbildung 53

Hotspots besonders stark korrigierter Bereiche der lokal korrigierenden LAM, nach einfachem Verfahren (Weichzeichnung)

Zunächst soll jedoch die Zuweisung einer lokal erreichbaren Wiedergabe verfeinert werden. Bisher wurde mit naiven Zuteilungen gearbeitet, also entweder der Wert des Feldes, in dem ein Pixel liegt oder der korrespondierende Pixel der weichgezeichneten Felder herangezogen (Abbildung 50) Die verfeinerte Zuweisung löst sich von der Einteilung in Felder und verwendet stattdessen ein Gitter. Dabei liegt jeder Schnittpunkt des Gitters exakt im Zentrum eines der zuvor verwendeten Felder und erhält dessen lokal erreichbare Luminanz als Wert. Die einem Pixel zugewiesene zu erreichende Luminanz wird nun darüber bestimmt, dass die drei naheliegenden Gitterschnittpunkte bestimmt werden und deren Werte mittels Gewichtung

über die Abstände zum Pixel interpoliert werden. Abbildung 54 zeigt das Bild mit den aus dem Luminanz-Surface des Displays (Abbildung 44, rechts) gewonnen pixelgenauen zu erreichenden Wiedergaben. Das Gitter definiert 15 horizontale und 5 vertikale Kanten. Dabei wurde mittels

$$l_{x,y}(l_1, l_2, l_3, d_1, d_2, d_3) = \sqrt{\frac{\frac{l_1}{d_1} + \frac{l_2}{d_2} + \frac{l_3}{d_3}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3}}}$$

interpoliert. Wobei l_1, l_2, l_3 die Werte der drei naheliegendsten Schnittpunkte des Gitters zu Pixel (x, y) und d_1, d_2, d_3 die dazugehörigen Entfernungen der Schnittpunkte zum Pixel angeben. Durch einen weiteren Parameter lässt sich der Einfluss der Entfernung steuern.

$$l_{x,y}(l_1, l_2, l_3, d_1, d_2, d_3, n) = \sqrt{\frac{\frac{l_1}{d_1^n} + \frac{l_2}{d_2^n} + \frac{l_3}{d_3^n}}{\frac{1}{d_1^n} + \frac{1}{d_2^n} + \frac{1}{d_3^n}}}$$



Abbildung 54

Lokal erreichbare Wiedergabe, generiert durch Interpolation der drei naheliegenden Knoten des Gitters.

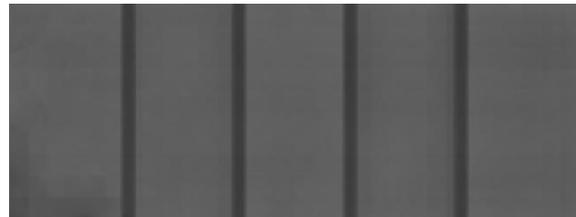


Abbildung 55

LAM auf Basis der lokal erreichbaren Wiedergaben (Abbildung 54)

Allerdings ist bereits die einfachere Variante rechenintensiv. Die Berechnung wird für jeden Pixel des Luminanz-Surfaces durchgeführt. Weitere sechs Potenzberechnungen in Gleitkommaarithmetik pro Funktionsaufruf, werden die Laufzeit noch weiter ausdehnen.

In Abbildung 54 sind Kanten zu erkennen. Diese liegen in den Bereichen, wo die sich die Zusammensetzung der drei zu interpolierenden Gitterschnittpunkte ändert. Mit angepasstem Radius lassen sich diese „verwischen“.

Abbildung 55 zeigt die auf Basis von Abbildung 54 und wiederum Abbildung 44 (rechts) erzeugte LAM. Die in Abbildung 56 und Abbildung 57 gezeigte Charakteristik ist nahe an der des einfachen Ansatzes zur Generierung der lokalen LAM mittels Felder und Weichzeichner (Abbildung 52). Es fallen jedoch detailliertere Strukturen auf.

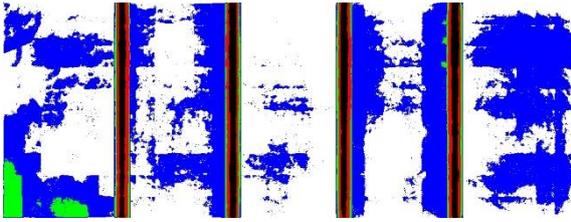


Abbildung 56

*Aufbereitete Darstellung der LAM aus Abbildung 55
Kolorierung: Siehe Abbildung 40*

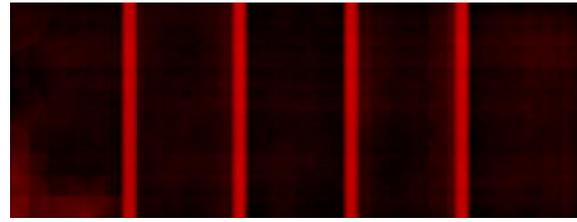


Abbildung 57

*Hotspots besonders stark korrigierter Bereiche der
LAM aus Abbildung 55*

Abbildung 58 zeigt die simulierte Korrektur durch die generierte LAM anhand der bekannten Testbilder, dem Foto aus Abbildung 47 und der weißen Fläche. Der Vergleich mit den korrespondierenden Resultaten in Abbildung 48 bzw. Abbildung 49, zeigt die höhere Helligkeit in weiten Teilen der Darstellung. Eine Bewertung der „echten“ Resultate bei der Projektion via Multi-Projektor-System, wird in Kapitel durchgeführt.



Abbildung 58

Simulierte Korrektur der Testbilder mittels lokal korrigierender LAM

3.1.4.2. Lokal gewichtete LAM

Die Generierung von LAMs nach dem Algorithmus aus [6] und die Generierung nach dem Prinzip aus 3.1.4.1 repräsentieren zwei gegensätzliche Ausrichtungen. Einerseits wird globale, andererseits lokale Uniformität angestrebt. Die lokale Uniformität ist natürlich von der Weite des Gitters bestimmt. Ein engeres Gitternetz erhöht den lokalen Bezug, ein weiteres Gitternetz bringt die Korrektur in Richtung globaler Uniformität. Ein für den speziellen Einsatzzweck passender Kompromiss findet sich, wenn beide Ausrichtungen gewichtet kombiniert werden. Ein Multi-Projektor-System, das der Betrachter im Ganzen simultan erfasst, wird sicher mit dem Fokus globaler Uniformität korrigiert. Ein anderes System, möglicherweise überproportional breit oder hoch, besonders groß oder mit besonders nahe positionierten Betrachtern, kann mit anderer Priorisierung korrigiert werden. Hier kann das Display in überwiegenden Bereichen heller erscheinen, jedoch eine geringere Uniformität aufweisen.

Praktisch umsetzen lässt sich die gewichtete Kombination auf verschiedene Weise. Die aus 3.1.4.1 bekannte Funktion

$$l_{x,y}(l_1, l_2, l_3, d_1, d_2, d_3) = \sqrt{\frac{\frac{l_1}{d_1} + \frac{l_2}{d_2} + \frac{l_3}{d_3}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3}}}$$

lässt sich entsprechend erweitern:

$$l_{x,y}(l_1, l_2, l_3, d_1, d_2, d_3, \beta, l_{min}) = (1 - \alpha) * \sqrt{\frac{\frac{l_1}{d_1} + \frac{l_2}{d_2} + \frac{l_3}{d_3}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} + \frac{1}{d_3}}} + \alpha * l_{min}$$

Hierbei ist $\alpha \in \{0 \dots 1\}$ die Gewichtung und l_{min} die allgemein erreichbare Wiedergabe. Die beschriebenen polaren Ausrichtungen entsprechen der Funktion bei $\alpha = 0$ bzw. $\alpha = 1$.

Sind bereits die beiden LAMs mit globaler bzw. lokaler Priorisierung bekannt, lässt sich die gewichtete Kombination auch durch Überlagern der beiden LAMs umsetzen. Liegt die lokale LAM über der globalen LAM, entspricht die Deckkraft der oberen Ebene dem Faktor α der alternativen Funktion.

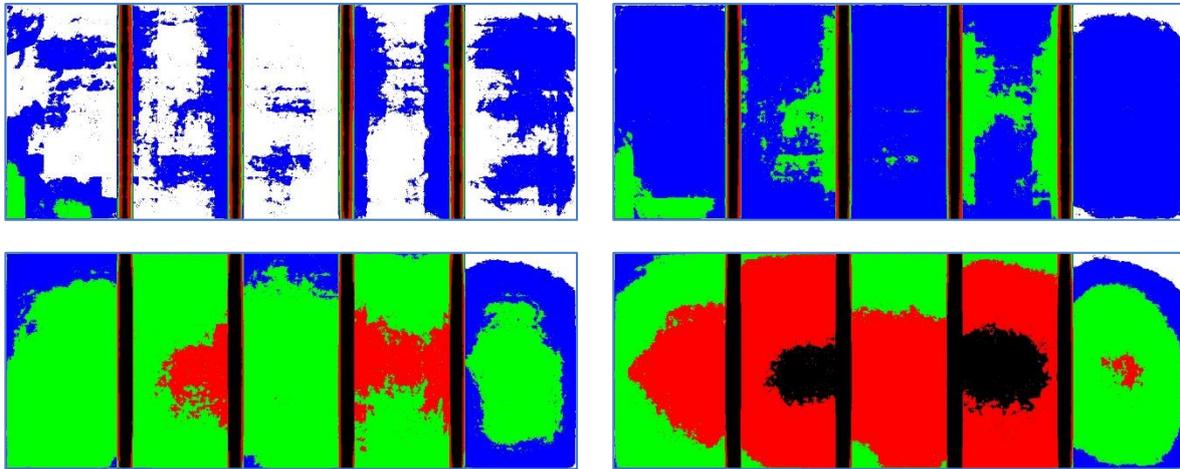


Abbildung 59

Gewichtete Zusammensetzung der LAM mit allgemein erreichbarer Wiedergabe und der LAM mit lokal erreichbarer Wiedergabe.

Links oben: $\alpha = 0$, rechts oben: $\alpha = 0.33$, links unten: $\alpha = 0.66$, rechts unten: $\alpha = 1$

Kolorierung nach dem Schema von Abbildung 40.

Abbildung 59 zeigen die Charakteristik verschiedener LAMs generiert aus dem erzeugten Luminanz-Surface (Abbildung 44, rechts). Die Charakteristik für $\alpha = 1$ und $\beta = 0$ sind bereits bekannt, entsprechen sie schließlich den bereits erzeugten LAMs. Der Parameter α führt bei den anderen beiden Abbildungen zu einer Mischform.

3.2. Praktische Implementierung

Der Weg von Kameraaufnahmen zum Abschluss der Korrektur lässt sich in 4 Schritte einteilen. Diese sind (1) geometrische Kalibrierung, (2) Gewinnung des Luminanz-Surface des Displays, (3) Generierung der LAMs und (4) Korrektur anzuzeigender Inhalte.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass es im Gegensatz zum in 2.3 vorgestellten Algorithmus aus [6] nicht nötig ist, aus dem Kamera-Raum in Display-Raum zu transformieren um schließlich durch weitere Transformationen in die Projektorräume zu gelangen. Insbesondere die Rekonstruktion des Luminanz-Surface des Displays, birgt die Gefahr durch Ungenauigkeit insbesondere überlappende Bereiche signifikant falsch nachzubauen. In diesen Bereichen sind auf relativ kleinem Raum große Helligkeitsunterschiede. Selbst wenn die überlappenden Bereiche vorbehandelt sind, wirkt sich dies noch aus. Außer der besseren Darstellung der Vorgänge für menschliche Betrachter, gewinnt das Verfahren durch die Einführung des Displayraums nichts. Während davon ausgegangen wird, dass die Ausrichtung der Projektoren nicht absolut exakt ist, sich die Beziehungen zwischen Display- und Projektorräume nicht aus den Vorgaben ergeben, wird auf diese Transformationen vertraut. Wie erwähnt, reicht die Auflösung der Kamera weder in [6] noch im Szenario des Multi-Projektor-Systems der Universität Stuttgart um pixelgenaue Zuordnung zu erreichen (mit Aufnahme des gesamten Displays in einem Bild). Wie die praktische Implementierung zeigt, ist der Displayraum obsolet.

Ein beispielhaftes Szenario wird den vier Schritten unterzogen und soll die theoretischen Ausführungen unterstützen.

3.2.1. I. Schritt, geometrische Kalibrierung

Das Multi-Projektor-System besteht aus fünf Projektoren. Somit müssen zumindest fünf Elemente (die Felder der Projektoren) im Kameraraum erkannt werden. Allerdings werden für jeden Projektor je vier Projektor-Viertel erkannt. Jedes Viertel hat halbe Breite und halbe Höhe des Projektorfelds. Im 4. Schritt werden diese Viertel benötigt.

Abbildung 60 zeigt die ersten vier Aufnahmen. Dies sind die Viertel $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{14}$ des ersten Projektors. Für fünf Projektoren sind 20 Aufnahmen nötig. Die Ecken der Viertel werden mittels Verfahren von Shi und Tomasi (siehe 3.1.1) aus den Aufnahmen extrahiert. OpenCV besitzt eine Implementierung dieses Verfahrens und wird verwendet. Um die Zeitkomplexität zu verringern, wird ein vom Anwender festgelegter oberer und unterer Rand aller Aufnahmen entfernt. Die gezeigten vier Aufnahmen sind noch nicht beschnitten. Zum Ende des 1. Schritts liegen die Ecken aller Projektor-Viertel im Kameraraum vor.

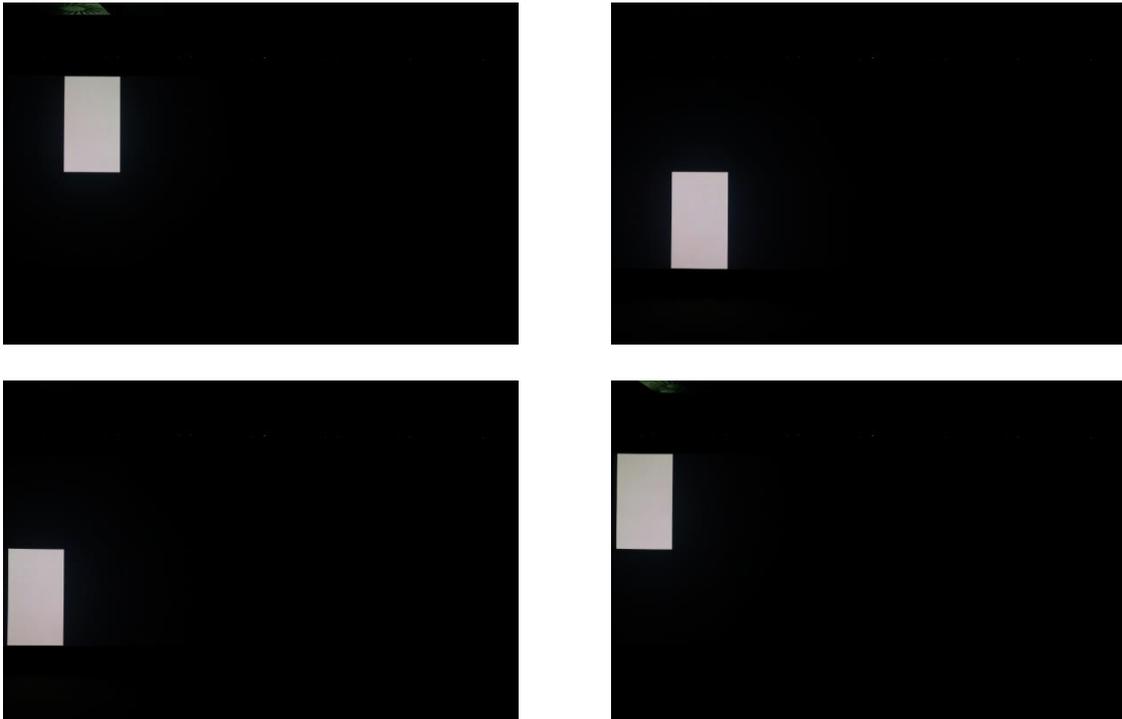


Abbildung 60

Zur Erfassung der Viertel der ersten Projektorfläche aufgenommene Darstellungen.

3.2.2. II. Schritt, Luminanz-Surface

Wie bereits bemerkt, wird das Luminanz-Surface nicht in Display- oder Projektorräume zusammengesetzt. Aus dem ersten Schritt ist die Position der Viertel der Projektoren im Kameraruum bekannt. Mit weiteren Aufnahmen wird das Display bei flächig maximalen Input nach Vorbehandlung der überlappenden Bereiche erfasst. Hierfür reichen zwei Aufnahmen. Diese sind in Abbildung 61 zu sehen. Wurde bei den bisherigen Aufnahmen ein Beschnitt durchgeführt, muss dieser hier selbstverständlich ebenfalls angewendet werden. Im Gegensatz zu [6] werden die Aufnahmen bei maximalem Input aller Kanäle gemacht. Obwohl [6] erkennt, dass die Korrektur pro Kanal keine Verbesserung bringt, wird trotzdem nur der maximale Input des grünen Kanals erfasst. Möglicherweise wurde so verfahren, weil die verwendete Kamera die Dynamik zwischen maximalem und minimalem Input aller Kanäle nicht auflösen konnte. Wenn alle Kanäle mit einer LAM korrigiert werden erscheint es zielführender, auch die gemeinsame Ausgabe aller Kanäle zu evaluieren.

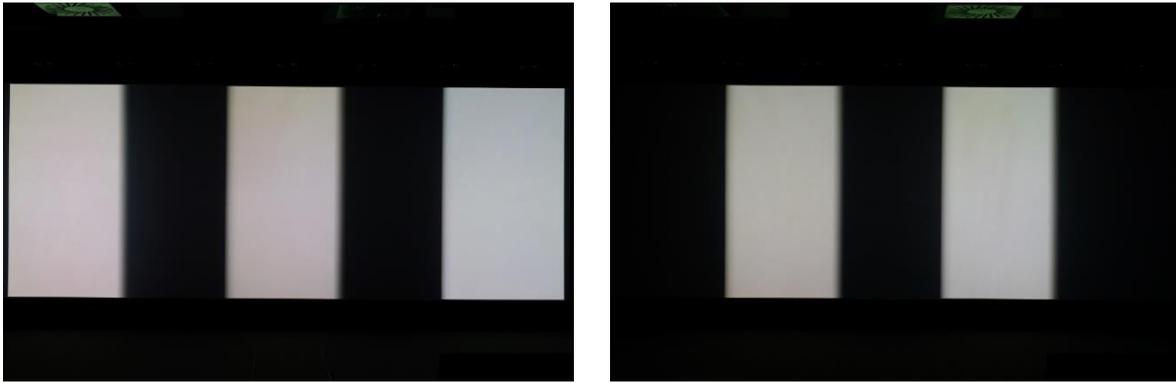


Abbildung 61

Zur Erfassung der Wiedergabe aller Projektoren bei maximalem Input aufgenommene Ausgaben. Benachbarte Projektoren sind nicht in derselben Aufnahme an. Aufnahmen noch nicht beschnitten.

Nun wird ein schwarzes Bild L mit Dimensionen der bisherig verarbeiteten (beschnittenen) Aufnahmen erzeugt. Aus den jeweils vier erkannten Vierteln eines Projektors wird eine Maske pro Projektor erzeugt. Diese ist weiß, wo ein Viertel liegt und sonst schwarz. Für die fünf Masken wird die passende Aufnahme aus Abbildung 61 gewählt (entsprechender Projektor an). Der Reihe nach werden nun die



Abbildung 62

Aus Abbildung 61 generiertes Luminanz-Surface des Displays im Kameraraum

Kombinationen aus Masken M_i und Aufnahmen I_i abgearbeitet (die Aufnahmen kommen mehrmals vor). Jede Maske und jede verwendete Aufnahme wird einmal mit Radius von vier Pixel weich gezeichnet, der Radius orientiert sich am Verfahren aus [6], wo jeweils über vier Pixel interpoliert wird. Für jeden Pixel $M_i(x, y)$ an dem die Maske weiß ist, wird die Luminanz des Pixels $I_i(x, y)$ berechnet (siehe 2.2.1) und nach den in 3.1.2 erarbeiteten Funktionen linearisiert, das Ergebnis ist l . Besitzt $L(x, y)$ den Wert 0, wird $L(x, y) = l$ gesetzt. Andernfalls wird der in 3.1.3.1 ausgeführte Algorithmus verwendet und es wird $L(x, y) = \text{map}(l, L(x, y))$ gesetzt. Nachdem alle fünf Kombinationen abgearbeitet sind, ist das Luminanz-Surface des Displays im Kameraraum rekonstruiert. Abbildung 62 zeigt das gewonnene Luminanz-Surface des Displays im beschnittenen Kameraraum. Dieser Raum umfasst noch Bereiche außerhalb des Displays. Durch die Zusammensetzung unter Verwendung der Masken sind diese Bereiche jedoch schwarz.

3.2.3. III. Schritt, Generierung der LAMs

Dass das Luminanz-Surface mit weiteren Bereichen außerhalb der Displayfläche des Kameraraums versehen ist, verlangt zwei Modifikationen der LAM-Generierung nach [6]. Zunächst

wird die Suche nach der allgemein erreichbaren Wiedergabe 0 ergeben. Die erste Modifikation ist deshalb, dass Pixel $L(x, y) = 0$ bei der Suche ignoriert werden.

Abbildung 63 zeigt die generierte LAM. Abbildung 64 charakterisiert die LAM. Für alle Pixel mit $L(x, y) = 0$ wird keine Korrektur berechnet und der Wert 100% für den korrespondierenden Pixel der LAM festgelegt - dies ist die zweite Modifikation.



Abbildung 63

Global Korrigierende LAM im Kameraraum.

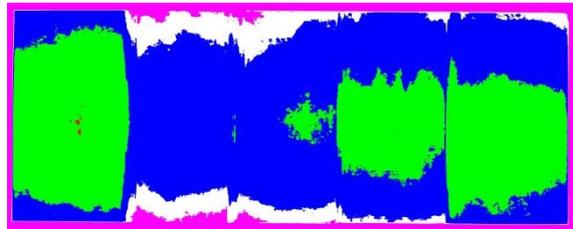


Abbildung 64

Aufbereitete Darstellung von Abbildung 63.

Kolorierung: Korrekturfaktor

< 65% → Schwarz

< 75% → Rot

< 85% → Grün

< 95% → Blau

≥ 95% → Weiß

exakt 100% → Rosa

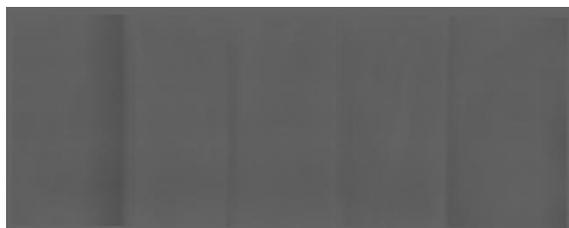


Abbildung 65

Lokal korrigierende LAM auf Basis eines 15x5 Rasters

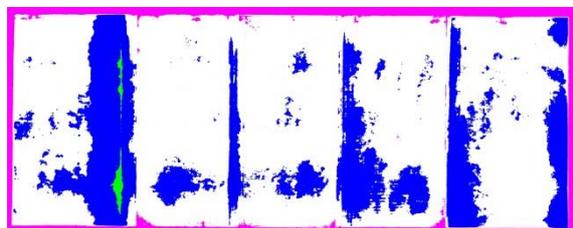


Abbildung 66

Aufbereitete Darstellung von Abbildung 65.

Kolorierung: siehe Abbildung 64.

In 3.1.4.1 und 0 wurde die Idee einer lokalen bzw. lokal gewichteten LAM vorgestellt. Die Gewinnung von LAMs dieser Art funktioniert mit dem schwarzen Rahmen im Luminanz-Surface auch nicht ohne Modifikation. Ist der Rand dünn genug, dass kein Feld ausschließlich im Randbereich liegt, genügt es wieder Pixel mit $L(x, y) = 0$ zu ignorieren. Liegt mindestens ein Feld ausschließlich im Rand, muss der Beschnitt enger gewählt oder die Feldgröße erhöht werden. Abbildung 65 zeigt die LAM, die mit dem Luminanz-Surface aus Abbildung 62 generiert wurde. Das Surface wurde durch 15x5 Raster geteilt und in jedem Feld die dunkelste Luminanz gesucht, wobei jeweils die schwarzen und zusätzlich dunkelsten 2% der Pixel ignoriert wurden. Abbildung 66 zeigt die Charakteristik der LAM.

Aus den beiden LAMs (Abbildung 63, Abbildung 65) wird eine lokal gewichtete LAM gewonnen. Es wird $\alpha = 0.5$ verwendet, siehe 0. Die resultierende LAM im Kameraraum ist in Abbildung 67 zu sehen, ihre Charakteristik in Abbildung 68.

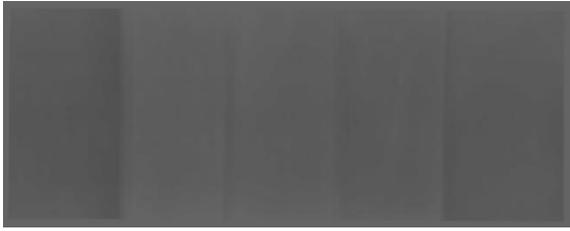


Abbildung 67

LAM im Kameraraum

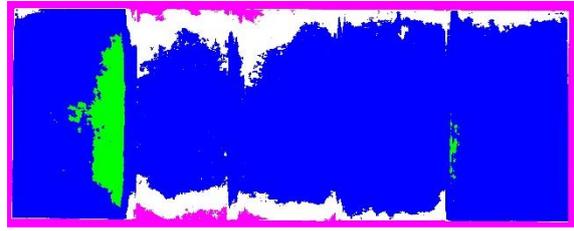


Abbildung 68

*Aufbereitete Darstellung von Abbildung 67.
Kolorierung: siehe Abbildung 64*



Abbildung 69

LAM des linken Projektors vor Hinzufügen der Vorbehandlung

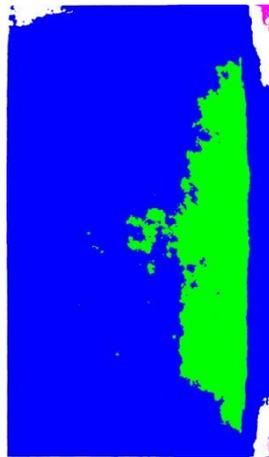


Abbildung 70

*Aufbereitete Darstellung von Abbildung 69.
Kolorierung: siehe Abbildung 64.*



Abbildung 71

LAM des linken Projektors nach Hinzufügen der Vorbehandlung

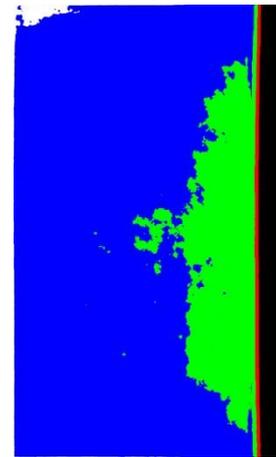


Abbildung 72

*Aufbereitete Darstellung von Abbildung 71.
Kolorierung: siehe Abbildung 64.*

Die Extraktion der LAMs für einzelne Projektoren wurde in [6] durch

$$A_{P_i}(x_{P_i}, y_{P_i}) = A_d(T_{P_i \rightarrow D}(x_{P_i}, y_{P_i}))$$

erreicht. Da aber weder eine LAM A_d in Displayraum vorliegt, noch Transformationen bekannt sind, muss anders verfahren werden. Aus dem I. Schritt sind noch die Eckpunkte der Projektor-Viertel bekannt. Damit ist ein verlässlicher Bezug zwischen den Projektorräumen und der LAM im Kameraraum vorhanden. Für jeden Projektor werden die vier Viertel einzeln

aus der LAM kopiert, durch perspektivische Transformation ausgerichtet und einheitlich skaliert. Anschließend lassen sich die bearbeiteten Viertel-LAMs zusammensetzen. Abbildung 69 zeigt die LAM für den Projektor links. Abbildung 70 zeigt die Charakteristik, die dem korrespondierenden Ausschnitt aus Abbildung 68 entspricht. Der rosa Rahmen ist nicht mehr vorhanden, liegt er schließlich außerhalb des Bereichs im Kamerarum der Projektorfelder zeigt.

Bei Erfassung der Wiedergabe bei maximalem Input wurde allerdings bereits die Vorbehandlung überlappender Bereiche durchgeführt. Diese Vorbehandlung „fehlt“ bei Korrektur mit der gewonnenen LAM A_{P_i} . Um zu vermeiden, dass jeder Output zwei Korrekturen durchläuft – einmal die Vorbehandlung, einmal die LAM – wird die Vorbehandlung als LAM V_{P_i} formuliert. Durch komponentenweise Multiplikation der beiden LAMs entsteht die zusammenfassende LAM A'_{P_i} . Da der Korrekturfaktor nicht mit Werten $[0, \dots, 1]$, sondern durch die Helligkeit eines Pixel in einem Graustufenbilds repräsentiert wird, steht an Stelle der Multiplikation eigentlich eine umfangreichere Operation. Die Pixel können Werte im Bereich $[0, \dots, 100]$ annehmen:

$$A'_{P_i}(x_{P_i}, y_{P_i}) = \frac{A_{P_i}(x_{P_i}, y_{P_i})}{100} * \frac{V_{P_i}(x_{P_i}, y_{P_i})}{100} * 100 = \frac{A_{P_i}(x_{P_i}, y_{P_i}) * V_{P_i}(x_{P_i}, y_{P_i})}{100}$$

Das linke Projektorfeld wird nur auf der rechten Seite überlagert. Deshalb beinhaltet A'_{P_1} auf der linken Seite keine Vorbehandlung. Diese LAM entspricht Abbildung 71, die dazugehörige Charakteristik Abbildung 72.

3.2.4. IV. Schritt, Korrektur anzuzeigender Inhalte

Mit den LAMs $A_{P_i}, A'_{P_i}, V_{P_i}$ lassen sich anzuzeigende Inhalte korrigieren, wie in [6] beschrieben, siehe 2.3.1.2. Da A'_{P_i} bereits alle Korrekturen vereint, wird jeweils mit dieser LAM korrigiert. Aufgrund der Repräsentation von A'_{P_i} als Graustufenbild, wird die Korrektur einer Farbe c in RGB-Repräsentation durch einen Korrekturfaktor a wie folgt definiert, wobei $red(x), green(x), blue(x)$ den entsprechenden Wert des Kanals wiedergeben:

$$r(c, a) = \frac{red(c) * a}{100}, \quad g(c, a) = \frac{green(c) * a}{100}, \quad b(c, a) = \frac{blue(c) * a}{100}$$

Die Korrektur von Inhalten erfolgt erst nach Zerlegung in die Inhalte der Projektoren. Wie sich die beispielhaft erarbeiteten A'_{P_i} auf eine weiße Fläche auswirken, ist in Abbildung 73 zu sehen. Aus Abbildung 62 ging schon hervor, dass der Projektor links heller ist, wie die anderen. Dem wurde mit der Korrektur offensichtlich entgegen gewirkt. Mit einem anderen Faktor α in der Kombination der global und der lokal-gewichteten LAM (3.2.3), kann diese Korrektur verstärkt/geschwächt werden.

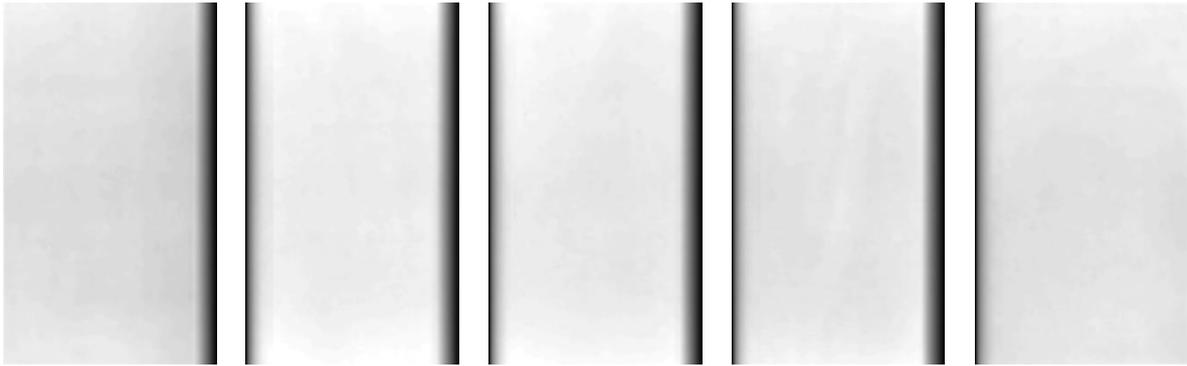


Abbildung 73

Per LAMs korrigierte weiße Flächen für die an der Darstellung beteiligten Projektoren.

3.2.5. Komponenten der Implementierung

Die praktische Implementierung baut auf drei Komponenten. Instanzen der ersten Komponente werden auf den Rechnern der Projektoren ausgeführt und stellen auf Anfrage gewünschte Inhalte über die Projektoren auf der Leinwand dar. Die zweite Komponente sendet Anfrage über darzustellenden Inhalten an Instanzen der ersten Komponente und erfasst deren Darstellung auf der Leinwand wiederum per verbundener Kamera. Die dritte Komponente wertet die aufgenommenen Inhalte aus und generiert daraus LAMs. Für jeden Projektor wird eine Instanz der ersten Komponente gestartet.

3.2.5.1. Kommunikation

Die Kommunikation zwischen zweiter und dritter Komponente beschränkt sich darauf, dass die dritte Komponente Aufnahmen nutzt, die von der zweiten Komponente an definierten Speicherorten abgelegt wurden. Die Kommunikation zwischen zweiter Komponente und den Instanzen der ersten ist hingegen weitaus komplexer. Die Implementierung definiert für die erste Komponente eine UDP-Schnittstelle, über die Befehle eines einfachen Protokolls empfangen werden. Das Protokoll umfasst die Beschreibung darzustellender Inhalte, Speicherorte anzuzeigender Bilder und Befehle zur

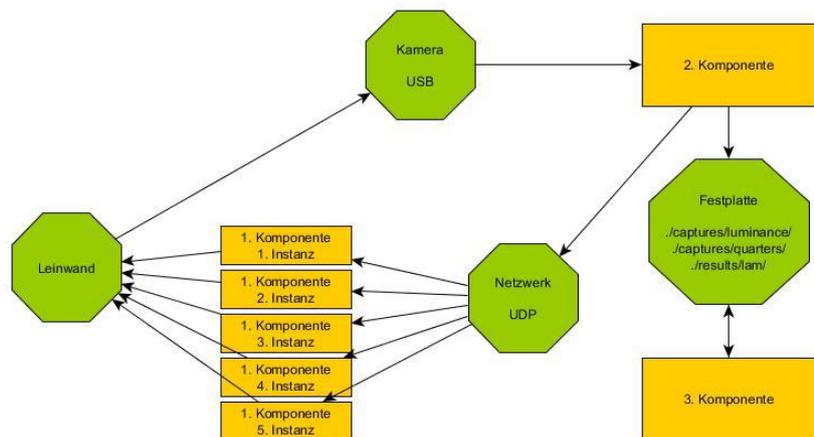


Abbildung 74

Informationsfluss der Implementierung.

Gelb: Entitäten Implementierungen

Grün: Weitere Entitäten im Informationsfluss (Schnittstellen zur Implementierung hin jeweils angegeben)

Die Implementierung definiert für die erste Komponente eine UDP-Schnittstelle, über die Befehle eines einfachen Protokolls empfangen werden. Das Protokoll umfasst die Beschreibung darzustellender Inhalte, Speicherorte anzuzeigender Bilder und Befehle zur

Steuerung des Programmflusses. Befehle werden durch Befehlswoorte und Variablenteile aufgebaut, die durch '\$' getrennt sind. Vorab wird die ID des Senders und ein '\$' gestellt.

Befehlswort 1	Befehlswort 2	Variablen	Beispiel	Reaktion
FULLSCREEN	NONSTOP	r/g/b	0\$FULLSCREEN\$ NONSTOP\$255/0/0	Projektor zeigt flächig Rot (#FF0000) an.
FULLSCREEN	SEGMENTS	r/g/b\$ w1/r1/g1/b1\$ w1/r1/g1/b1	0\$FULLSCREEN\$ SEGMENTS\$255/0/0\$ 255/0/0\$ 100/0/0/0\$ 200/255/255/255	Projektor zeigt flächig Rot (#FF0000) außer einem 100 Pixel breiten schwarzen Streifen links und 200 Pixel breiten weißen Streifen rechts an.
QUADS		r1/g1/b1\$ r2/g2/b2\$ r3/g3/b3\$ r4/g4/b4\$	0\$QUADS\$ 0/0/0\$ 0/0/0/0\$ 255/255/255\$ 0/0/0/0\$	Bestimmt die Färbung der vier Projektorviertel einzeln. Reigenfolge: rechts-oben, rechts-unten, links-unten, links-oben.
IMAGE		path	\$0\$IMAGE\$../share/img.jpg	Der Projektor zeigt das im übergeordneten Ordner share gespeicherte Bild img.jpg auf die Projektorfläche skaliert an.
FULLSCREEN	CLOSE		0\$FULLSCREEN\$ CLOSE	Beendet die Darstellung von Inhalten. Die Instanz bleibt allerdings aktiv.
SHUTDOWN			0\$SHUTDOWN	Beendet die Instanz.

Tabelle 1

Befehlssatz zur Steuerung der 1. Komponente

Die erste Komponente besitzt keine Möglichkeit eine Kommunikation anzuregen. Sie wartet dauerhaft an einem frei wählbaren Port auf UDP-Nachrichten und verarbeitet diese bei Empfang. Abbildung 74 skizziert den Informationsfluss zwischen den drei Komponenten. Besonderes Detail des Flusses ist der Kreislauf der ersten beiden Komponenten. Der Kreis ist zwar geschlossen, verwendet jedoch verschiedene Transportwege. Während der Fluss von der zweiten Komponente zu den Instanzen der ersten Komponente gewöhnlicher elektronischer

Datenverarbeitung entspricht, wird in der Gegenrichtung über Peripherie eine physikalische Veränderung bewirkt, die wiederum über Peripherie in elektronisch verarbeitbare Information gewandelt wird und weiterfließt.

3.2.5.2. Erste Komponente

Die Benutzerschnittstelle der ersten Komponente ist in Abbildung 75 abgebildet. Die erste Komponente erkennt beim Start die IP-Adresse des eigenen PCs und zeigt diese an. Über das Eingabefeld unter der IP-Adresse kann ein Port angegeben werden um einen UDP-Socket zu bestimmen, über den auf Befehle im definierten Protokoll (Tabelle 1) empfangen werden. Mit Klick des Start-Buttons wird auf den Socket „gelauscht“. Bei Klick des Stop-Buttons, wird der Socket frei gegeben. Empfangene Befehle werden im Log-Feld (Abbildung 75, untere Hälfte) protokolliert. Die Eckkoordinaten aller Displays des Systems, auf dem die Instanz ausgeführt wird, werden ebenfalls angezeigt (Abbildung 75, rechts oben). Beim Beenden des Programms wird der verwendete Port frei gegeben.

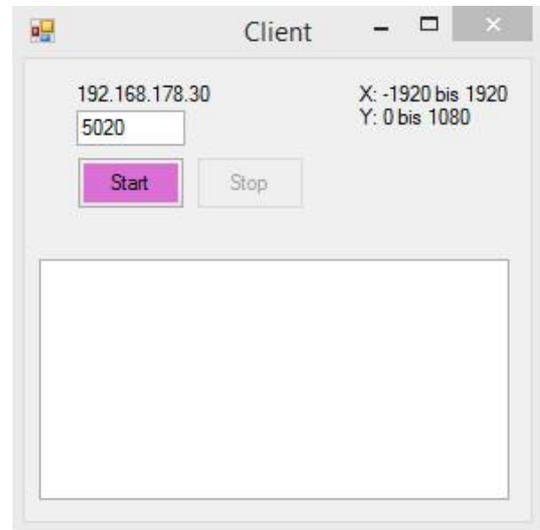


Abbildung 75

Benutzerschnittstelle der ersten Komponente

Werden Bilder oder andere Inhalte angezeigt, geschieht dies als Vollbild. Der Inhalt bedeckt alle virtuellen Desktops des PCs der Instanz und somit auch die gesamte Projektorfläche auf der Leinwand. Um dies als Einfluss auf Messungen auszuschließen, wird der Mauszeiger ebenfalls ausgeblendet. Mit dem Klick jeder Taste, wird der Vollbild-Modus verlassen, der Inhalt nicht mehr angezeigt und der Mauszeiger ist wieder verfügbar. Allerdings ist die manuelle Bedienung der ersten Komponente nicht nötig. Die Instanzen der Komponente lassen sich umfänglich per UDP message-based steuern.

Um den Start einer Instanz ohne Interaktion am PC selbst einfach zu ermöglichen, kann das Programm über Kommandozeile direkt im „lauschenden“ Zustand gestartet werden. Der Aufruf muss dabei die Parameter port und force angeben, also den Port des UDP-Sockets und die Angabe, ob mit dem „lauschen“ automatisch gestartet werden soll. Der Aufruf für Port 5013 lautet „*client.exe* 5013 1“ bzw. „*client.exe* 5013 0“ wenn nicht automatisch „gelauscht“ werden soll.

3.2.5.3. Zweite Komponente

Die zweite Komponente erlaubt es bis zu fünf Instanzen der ersten Komponente zeitgleich Befehle über UDP zu senden. Die IP-Adressen der Zielrechner werden in das jeweils erste

Textfeld und die Ports in das jeweils zweite Textfeld im „Radio Station“-Bereich der Benutzerschnittstelle eingetragen (siehe Abbildung 76). Der eingetragene Port entspricht dem, der in er der korrespondierenden Instanz der ersten Komponente angegeben wurde. Bei Klick des close-Buttons wird der Befehl `0$FULLSCREEN$CLOSE` an alle Einträge des „Radio Station“-Bereichs gesendet, welche mit gesetztem Haken versehen sind. Klick des shutdown-buttons sendet analog den Befehl `0$SHUTDOWN`. Mit dem send-Button wird jeweils der Befehl im letzten Textfeld gesendet.

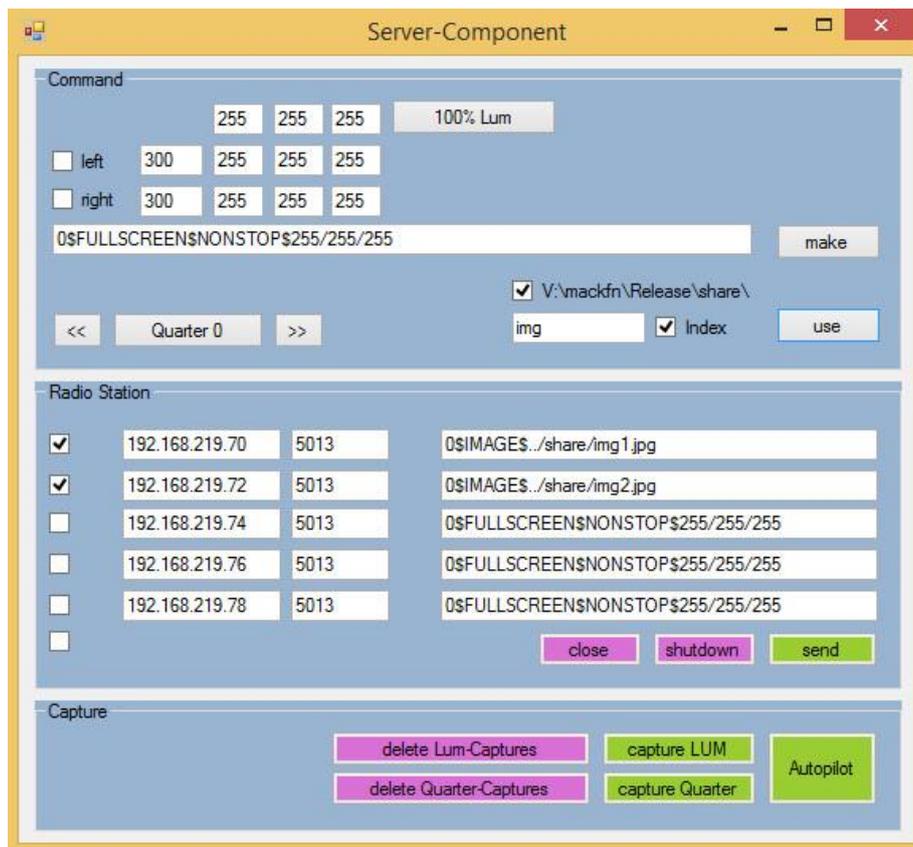


Abbildung 76

Benutzerschnittstelle der zweiten Komponente

Im „Command“-Bereich (siehe Abbildung 76) können Befehle generiert werden. In der ersten Reihe lässt sich eine Farbe über Rot-, Grün und Blau-Anteil definieren (Wertebereich [0, 1 ... 255]). Diese Farbe wird als Hauptfarbe für den `FULLSCREEN` Befehl verwendet. In den beiden Reihen darunter lässt sich optional ein linker bzw. rechter Streifen angeben. Die Breite wird im ersten Textfeld eingegeben, die Farbe, analog zur Hauptfarbe, in den folgenden drei Textfeldern. Der make-Button generiert den Befehl aus den drei Reihen, zeigt ihn im Textfeld links des Buttons an und trägt ihn im „Radio Station“-Bereich für alle angegebenen UDP-Sockets ein, deren Haken gesetzt ist.

Der Quarter-Button im „Command“-Bereich erzeugt die nötigen Befehle um die Projektor-Viertel auf dem Display zu erkennen. Die Reihenfolge ist dabei vorgegeben. Jeder weitere Klick auf den Button sendet die Befehle um das jeweils nächste Viertel weiß anzuzeigen, alle anderen Viertel (aller Projektoren) bleiben schwarz. Mit den Buttons links bzw. rechts des Quarter-Buttons kann in der Choreografie manuell vor bzw. zurück gesprungen werden.

Zudem erlaubt der „Command“-Bereich noch die Anweisung eine Bild bzw. ein Teil eines zusammengesetzten Bilds anzuzeigen. Der Pfad/der Name der Datei (ohne Dateieinde) wird im Textfeld eingetragen. Mit setzen des Hakens vor „V:\mackfn\Release\share\“ wird dieser Pfad automatisch voran gestellt. Hinter den eingegeben Namen wird automatisch ein „.jpg“ angehängt. Mit setzen des Index-Haken wird zuvor noch eine fortlaufende Nummer beginnend bei 1 eingefügt.



Abbildung 77

Erfassung der Wiedergabe bei maximalem Input der Projektoren mit ungerader Nummer (Bild links oben) und gerader Nummer (Bild rechts oben). Darunter jeweils die Befehlsätze in der Benutzeroberfläche der zweiten Komponente.

Zur Rekonstruktion des Luminanz-Surface ist eine Aufnahme jedes Projektors bei flächig maximalem Input nach Vorbehandlung der überlappenden Bereiche nötig. Diese werden in der Reihenfolge von links nach rechts gemacht. Ersatzweise können mit einer Aufnahme die Projektoren mit ungerader Nummer erfasst werden und mit einer zweiten Aufnahme die Projektoren mit gerader Nummer, siehe Abbildung 77. Bevor die zwei bzw. fünf Aufnahmen gemacht werden, müssen gespeicherte Aufnahmen gelöscht werden. Dies geschieht mit dem Button „delete LUM-Captures“. Andernfalls kann die dritte Komponente nicht zuordnen, welche Aufnahmen zu verwenden sind. Nachdem auf dem Display die gewünschte Ausgabe er-

scheint, kann eine Aufnahme mit dem „capture LUM“-Button erstellt werden. Im Ordner ./results/projectors/ befinden sich fünf Bilddateien img1.jpg bis img5.jpg, die eine weiße Fläche mit Vorbehandlung überlappender Bereiche bereitstellen. Dies gilt ebenso für die erste Komponente. Die Bilder müssen deshalb nicht auf für alle Instanzen der ersten Komponente zugänglichen Speicher abgelegt werden. Es reicht, einen IMAGE-Befehl mit dem relativen Pfad zu senden.

Mit dem „delete Quarter-Captures“-Button verhält es sich analog zum „delete LUM-Captures“-Button. Vor Aufnahme der 20 Projektor-Viertel müssen gespeicherte Aufnahmen gelöscht werden. Mit „capture Quarter“-Button wird eine Aufnahme erstellt. Die Reihenfolge muss dabei zwingend die des „Quarter“-Buttons im „Command“-Bereich sein.

Der „Autopilot“-Button führt den gesamten Prozess automatisiert durch. Zunächst werden beide Speicher gelöscht, dann automatisch alle nötigen Inhalte erzeugt und erfasst. Falls die Kamera nicht mit dem PC verbunden ist, können die Aufnahmen auch manuell gemacht werden. Die zwei bzw. fünf Aufnahmen der Luminanz müssen in den Ordner ./captures/luminance/ innerhalb der Lösung kopiert werden; die 20 Aufnahmen der Projektor-Viertel in den Ordner ./captures/quarters/.

3.2.5.4. Dritte Komponente

Die dritte Komponente ist technisch anspruchsvoll. Teils komplexe Prozesse des Bildverstehens, der Bildverarbeitung und der statistischen Auswertung sind nötig, um aus den gespeicherten Aufnahmen LAMs zu generieren. Nichts desto trotz, soll der Anwender von den zugrundeliegenden Vorgängen gekapselt bleiben. Allein die Zeitkomplexität lässt sich nicht verbergen. Einstellungsmöglichkeiten beschränken sich auf die Definition des Gitters der lokalen Optimierung (siehe 3.1.4.1) und der Gewichtung des lokalen gegenüber dem globalen Bezugs der Korrektur. Mit Klick des „start“-Buttons werden LAMs generiert und im

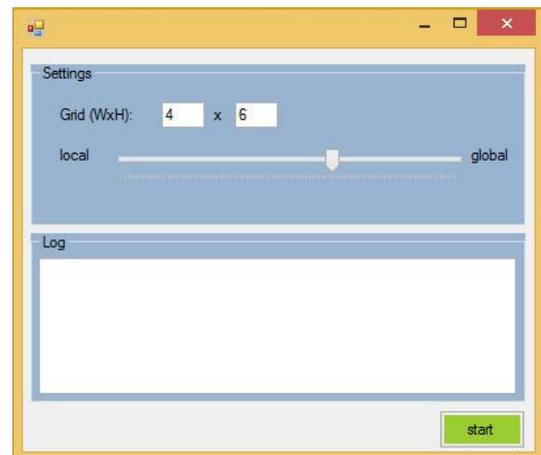


Abbildung 78

Benutzerschnittstelle der dritten Komponente Ordner ./results/lam/ persistent gemacht. Der Anwender wird während der Laufzeit über das Log-Feld und Konsolenausgaben über den Programmverlauf informiert.

Der vollumfängliche Prozess umfasst zehn Teilschritte. Dies sind in Reihenfolge der Bearbeitung in Tabelle 2 aufgeführt.

	Beschreibung	Log-/Konsolenausgabe
1	Einlesen der zwei/fünf Aufnahmen bei flächig maximalem Input der Projektoren.	Reading Luminance-Captures
2	Einlesen der 20 Aufnahmen der Projektorviertel und Erkennung der Ecken der Viertel.	Reading Quarter-Captures
3	Rekonstruktion des Luminanz-Surface im Kameraraum-	Generating Luminance-Surface
4	Bestimmung der allgemein erreichbaren Wiedergabe (x) und Generierung der globalen LAM im Kameraraum.	Generating Global LAM (x)
5	Bestimmung der Karte lokal erreichbarer Wiedergaben und Generierung der lokalen LAM im Kameraraum.	Generating Local LAM
6	Gewichtete Kombination der lokalen und globalen LAM im Kameraraum.	Alpha Blending
7	Transformation der lokal gewichteten LAM im Kameraraum in die 5 Projektorräume.	Split
8	Hinzufügen der Vorbehandlung überlagerter Bereiche zu den LAMs im Projektorraum.	Add Gradient
9	Speichern einer LAM zu jedem Projektorviertel im Ordner ./results/lam/	Save

Tabelle 2

Workflow der LAM-Generierung:

Die resultierenden 20 LAMs werden nach dem in Abbildung 79 gezeigten Schema benannt und im Order ./results/lam/ gespeichert. Ihre Auflösung entspricht dem korrespondierenden Desktop. Somit lassen sie sich bei ausgewählten NVIDIA Quadro Grafikkarten⁹ mit passender NVAPI¹⁰ diese Bilder verwenden, um die berechneten Luminanz-Anpassungen von der Grafikkarten auf jede Ausgabe anwenden zu lassen.

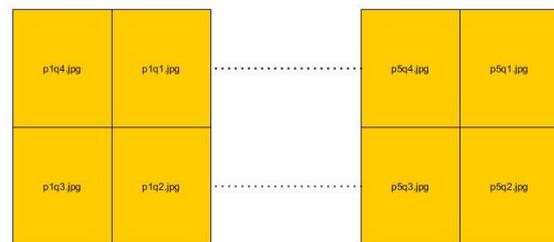


Abbildung 79

Terminologie der gespeicherten LAMs

⁹ u.a. NVIDIA Quadro 5000, 6000, Plex 7000

¹⁰ NVIDIA Software Development Kit, NDA-Version mit Möglichkeit die Blending-Funktionen der Grafikkarte anzusprechen.

4. Resultate

Die Ergebnisse der Korrekturen mittels LAM lassen sich in zwei Ebenen interpretieren. Einerseits können statistische Aussagen getroffen werden, andererseits können subjektive Eindrücke des Betrachters genannt werden. Beide Ebenen sollen genutzt werden. Die gesammelten Resultate sollen wiederum genutzt werden, das Korrekturverfahren zu optimieren.

Verwendet werden zwei Testbilder, das erste ist eine weiße Fläche, das zweite eine Aufnahme vom Gebäude des Visualisierungsinstituts der Universität Stuttgart, indem sich auch das verwendete Multi-Projektor-System befindet. Die weiße Fläche bietet sich für die statistische Auswertung und die subjektive Bewertung an, die Fotografie nur für die subjektive Bewertung. Abbildung 80 und Abbildung 81 zeigen die beiden Inhalte ohne Korrektur auf dem Multi-Projektor-System der Universität Stuttgart.

4.1. Auswertung

Wurde in der Bestimmung der Wiedergabe auf dem Display bisher der vermutliche Projektor-Input rekonstruiert, ist die Rekonstruktion bei der Bewertung der korrigierten Ausgaben auf der Leinwand nicht mehr angebracht. Belastbar sind geräteunabhängige Werte, die sind jedoch nicht einfach zu erhalten. Mit dem in 3.1.2 vorgestellten Verfahren aus [13] lässt sich die Ausgabe einer Kamera vom Geräteeinfluss befreien. Trotzdem sind geräteabhängige Aussagen nicht völlig ungeeignet. Die Ausgabe der Kamera ist eine subjektive Beobachtung, die Wahrnehmung des menschlichen Betrachters allerdings auch. Die Annahme Kamerahersteller orientieren sich bei der Gestaltung des Zusammenhangs zwischen Beobachtung und Bildinhalt an menschlicher Wahrnehmung, erscheint plausibel. Mit Einstellungen für Kontrast und veränderte Schatten- und Lichterzeichnung¹¹ lässt sich eine relevant andere Wiedergabe erzeugen. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass „neutrale“ Kameraeinstellungen mit festem Weißabgleich, einheitlicher Belichtungszeit, Blende und Kameraempfindlichkeit, die Ergebnisse belastbar machen. Die sensible Reaktion der menschlichen Wahrnehmung auf lokale Helligkeitsverläufe [3] ist statistisch jedoch kaum abbildbar, geht in global ermittelten Kennzahlen unter. In 4.1.6 wird deshalb für die lokal begrenzten Bereiche überlappender Projektionen auf subjektive Eindrücke vertraut.

In diesem Kapitel abgebildete Aufnahmen sind mit den bereits gezeigten Aufnahmen nur bedingt vergleichbar. Für die Auswertung werden fünf andere modellgleiche Projektoren eingesetzt. Auffälliger Unterschied ist bspw., dass der linke Projektor nun nicht mehr vergleichsweise dunkel, sondern hell projiziert.

¹¹ Bspw. Nikon Active D-Lightning

4.1.1. Ausgangssituation

Abbildung 80 veranschaulicht verschiedene Problemfelder. Zunächst überwiegt der Eindruck der hellen überlappenden Bereiche. Dieser Eindruck wiederholt sich in Abbildung 81. Die weiße Fläche zeigt jedoch, dass die Projektoren grundsätzlich unterschiedlich hell projizieren und abweichende Farbstiche zu erkennen sind. Während der erste Projektor (links) besonders hell ist und einen rosa Stich aufweist, erscheint der fünfte Projektor mit blauem Stich. Der dritte Projektor neigt wieder ins Rosa, während Projektoren zwei und vier grünlich erscheinen. In Abbildung 81 sind diese Farbstiche weniger prägnant, obwohl sie in homogenen Flächen durchaus ins Auge stechen. Zur Wiedergabe des Fotos ist es grundsätzlich schwierig eine Aussage zu treffen, die über die überlappenden Bereiche hinausgeht. Diese sind so dominant, dass sie andere Faktoren ausstechen.



Abbildung 80

Testbild weiße Fläche ohne Korrektur



Abbildung 81

Testbild Fotografie vom Gebäude des Visualisierungsinstituts der Universität Stuttgart ohne Korrektur

Statistisch lässt sich zu Abbildung 80 eine durchschnittliche Luminanz von 72,3 ermitteln. Die Standardabweichung vom Mittelwert beträgt 5,4, was 7,5% entspricht. Aussagekräftig ist die bestimmte Standardabweichung noch nicht, da die überlappenden Bereiche diese Kennzahl maßgeblich beeinflussen. Abbildung 82 veranschaulicht die Abweichungen vom Mittelwert auf der Leinwand.

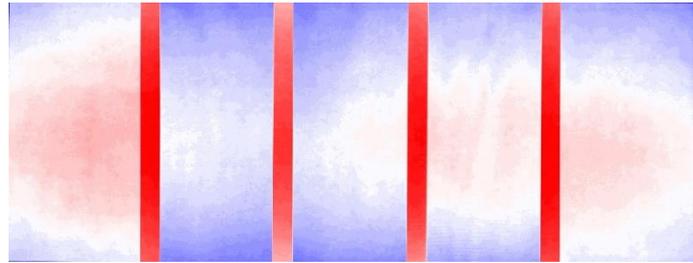


Abbildung 82

*Aufbereitete Darstellung von Abbildung 80.
Durchschnittliche Luminanz (72,3): Weiß
Umso dunkler desto blauer,
umso heller: desto roter.*

4.1.2. Vorbehandlung überlappender Bereiche

Mit der in 3.1.1 erarbeiteten Vorbehandlung mittels Sigmoid und zugehöriger Ergänzungsfunktion (Abbildung 34, rechts), wird vor der Projektor-Input vor weiteren Korrekturen modifiziert. Abbildung 83 zeigt die dadurch entstandene Darstellung der weißen Fläche auf der Leinwand. Die überlappenden Bereiche haben ihre Dominanz verloren und obwohl nun die unterschiedlichen Farbstiche und Helligkeiten der Projektoren deutlicher ins Auge stechen, wurde ein großer Schritt Richtung homogenem Eindruck gemacht. Abbildung 84 zeigt die resultierende Darstellung der Fotografie. Auch hier ist der Eindruck homogener, wenngleich die Unterschiede in der Farbstich Helligkeit der Projektorfelder nun prägnanter wirken.

Für die Darstellung von Inhalten, bei denen der wissenschaftliche Gehalt den visuellen Gehalt dominiert, erscheint dieses Zwischenergebnis bereits akzeptabel.

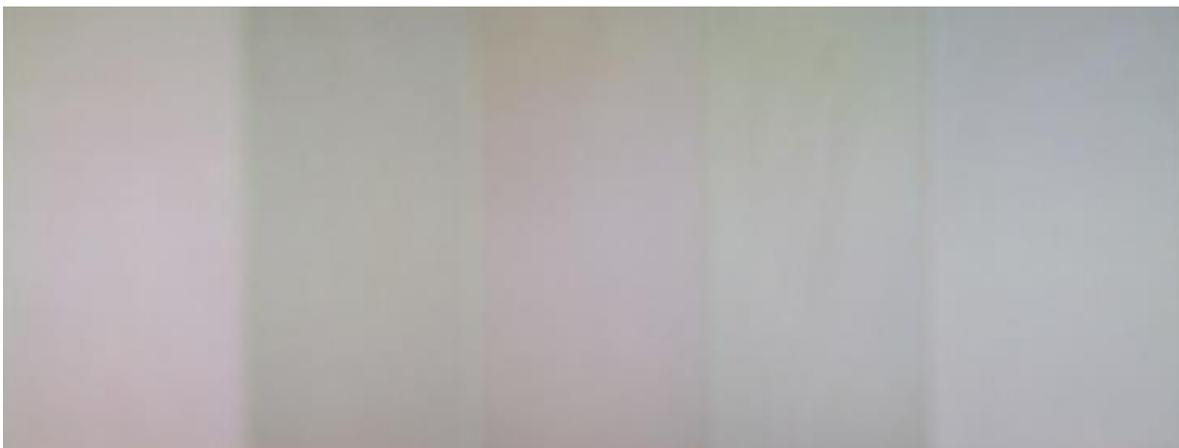


Abbildung 83

Testbild weiße Fläche nach Vorbehandlung mit Sigmoid und zugehöriger Ergänzungsfunktion.



Abbildung 84

Testbild Fotografie nach Vorbehandlung mit Sigmoid und zugehöriger Ergänzungsfunktion.

Die Luminanz in Abbildung 83 hat einen Mittelwert von 68,4 mit relevant verbesserter Standardabweichung von 2,9, was 4,2% entspricht. Abbildung 85 visualisiert diese Zahlen. Was in dieser Aufbereiten Darstellung dominant erscheint ist einerseits die unterschiedliche Helligkeit der Projektoren und andererseits die Vignette, die bei jedem Projektor auszumachen ist. Über die unterschiedlichen Farbstiche sagt diese Abbildung freilich nichts aus. In Abbildung 83 ist die Güte der Vorbehandlung nicht zweifelsfrei zu bestimmen, die Farbstiche überlagern den Eindruck etwas. Abbildung 85 zeigt jedoch, dass sich die Korrektur in den überlappenden Bereichen ungefähr auf dem Niveau der umliegenden Bereiche liegt.

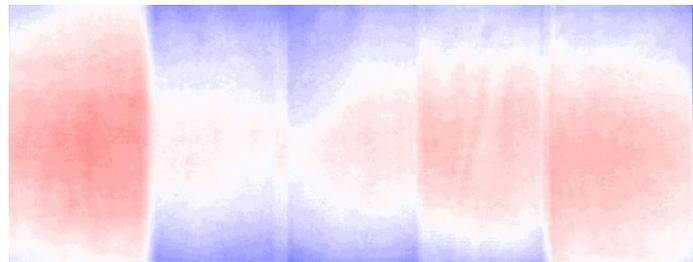


Abbildung 85

*Aufbereitete Darstellung von Abbildung 83
Durchschnittliche Luminanz (68,4): Weiß
Umso dunkler desto blauer,
umso heller: desto roter.*

4.1.3. Globale Optimierung

In 3.1.4 wurde die grundsätzliche Ausrichtung der Korrektur diskutiert, die Resultate eines rein global optimierenden Ansatzes – ganz im Sinne von [6] – werden im Folgenden betrachtet. Abbildung 86 zeigt die entsprechend korrigierte weiße Fläche. Die Darstellung auf der Leinwand ist dunkler als vor der Korrektur, allerdings – und das war das Ziel – erscheinen die verschiedenen Projektorfelder nun ähnlich hell. Die unterschiedlichen Farbstiche sind nicht eliminiert worden. Im Vergleich zu Abbildung 83, der weißen Fläche nur mit Vorbehandlung der überlappenden Bereiche, wirken die Übergänge zwischen den Projektorfeldern

heterogener. Das überrascht zunächst einmal, wird jedoch in 4.1.6 erläutert und eine Modifikation der Korrektur vorgeschlagen. Der Eindruck der korrigierten weißen Fläche wird von Abbildung 87 bestätigt.



Abbildung 86

Testbild weiße Fläche nach Vorbehandlung mit Sigmoid und zugehöriger Ergänzungsfunktion und Korrektur mit global ausgerichteter LAM.



Abbildung 87

Testbild Fotografie nach Vorbehandlung mit Sigmoid und zugehöriger Ergänzungsfunktion und Korrektur mit global ausgerichteter LAM.

Abbildung 88 zeigt vor allem die gestiegene Homogenität innerhalb der einzelnen Projektorfelder. Zwischen den Projektoren wurde die Situation ebenfalls verbessert, wenngleich die Korrektur des linken Projektors augenscheinlich zu stark ausfiel, während sie beim rechten

Projektor zu schwach ausfiel. Es erscheint durchaus plausibel, dass die Projektoren auf die Korrektur abweichend reagieren. Wenn schon vor der Korrektur deutliche Abweichungen in Helligkeit und Farbstich vorhanden sind, ist unstrittig, dass unterschiedliche Beziehungen (Gammakurven) zwischen Projektoren und deren Output vorliegen. Die Korrektur unterstellt jedoch einheitlichen Zusammenhang.

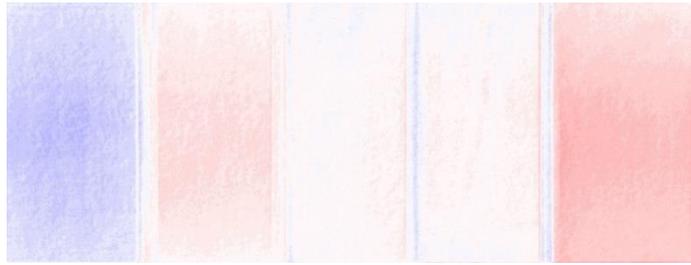


Abbildung 88

Aufbereitete Darstellung von Abbildung 86

Durchschnittliche Luminanz (61,6): Weiß

Umso dunkler desto blauer,

umso heller: desto roter.

Die Anomalie in Abbildung 88 ist demnach folgerichtig. Der neue Mittelwert der Luminanz ist entgegen Abbildung 83 deutlich auf 61,6 gefallen, die Standardabweichung auf 2,1 (3,4%) gesenkt.

4.1.4. Lokale Optimierung

Das in 3.1.4.1 vorgestellte Verfahren zur lokalen Korrektur von Luminanz-Unterschieden mittels LAMs, wurde ebenfalls auf die Testbilder angewendet. Dabei war zunächst zu klären, wie eng das zugrunde liegende Gitter gespannt werden soll. Es wurden zwei Varianten gewählt, eines mit 6x4 und eines mit 18x6 gleichmäßig verteilten Knoten. Die Karte der lokal erreichbaren Luminanzen (vergleiche Abbildung 54) wurde gerade so stark weichgezeichnet um die bei der Interpolation entstandenen erkennbaren Übergänge aufzuweichen.

Subjektiv fällt bei der Korrektur der weißen Fläche mit 6x4 Gitter (Abbildung 89) die insgesamt hellere Darstellung im Vergleich zur globalen Optimierung auf (Abbildung 86). Zudem ist durchgehend ein Helligkeitsabfall von der Leinwandmitte nach oben und unten wahrnehmbar. Bei der Fotografie (Abbildung 90) fällt dieser Gradient nicht mehr auf.



Abbildung 89

Testbild weiße Fläche nach Vorbehandlung mit Sigmoid und zugehöriger Ergänzungsfunktion und Korrektur mit lokal ausgerichteter LAM auf Basis eines 6x4 Gitters.



Abbildung 90

Testbild Fotografie nach Vorbehandlung mit Sigmoid und zugehöriger Ergänzungsfunktion und Korrektur mit lokal ausgerichteter LAM auf Basis eines 6x4 Gitters.

Abbildung 91 bestätigt den subjektiven Eindruck. Trotz des höheren Mittelwerts der Luminanz von 65,1 wurde die Standardabweichung relativ auf 2,1 (entspricht 3,2%) gegenüber der globalen Optimierung gesenkt. Der Unterschied ist nicht groß jedoch verwunderlich, wurde zuvor schließlich auf globale Uniformität hin korrigiert. Eine Erklärung kann sein, dass die folgenreichere Korrekturen der globalen Optimierung zu größeren Fehlern führt. Die lokale Optimierung hingegen bewirkt zwar eine gewollte Standardabweichung vom Mittelwert, vermindert jedoch die Fehler großer Korrekturen. Der Vergleich von Abbildung 88 und Abbildung 91 widerspricht dieser Theorie zumindest nicht.

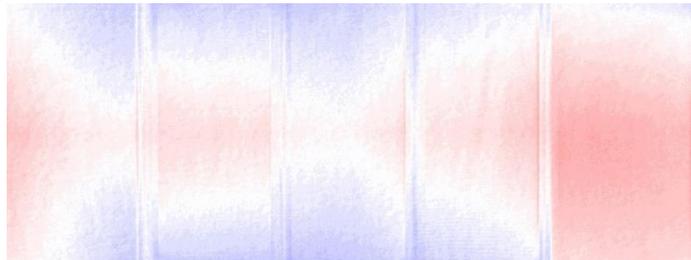


Abbildung 91

*Aufbereitete Darstellung von Abbildung 89
Durchschnittliche Luminanz (65,1): Weiß
Umso dunkler desto blauer, umso heller: desto roter.*

Von einer zentralen Horizontalen aus fällt bei alle Projektoren die Luminanz zum oberen und unteren Rand hin ab. Dies war die Intention hinter der Wahl eines Gitters mit vier Knoten in der Höhe. Damit liegt je ein Knoten am oberen und unteren Ende mit geringerer lokal erreichbarer Luminanz. Dazwischen sind zwei Knoten mit höherer lokal erreichbarer Luminanz. Somit läuft die Korrektur dieser unterschiedlichen Niveaus sanft. Die sechs Knoten in der vertikalen liegen jeweils etwa auf den Kanten der Projektoren.

Da für jeden Pixel die jeweils drei naheliegenden Knoten relevant sind, wird, abhängig von dem Verhältnis zwischen vertikaler und horizontaler Maschenweite des Gitters, bis über die gesamte Breite der Projektorfelder horizontal ausgeglichen. Abbildung 92 skizziert die Situation für ein Zwei-Projektor-System. Das Verhältnis zwischen vertikaler und horizontaler Schrittweite beträgt im verwendeten System tatsächlich etwa $\frac{1.6}{1}$.

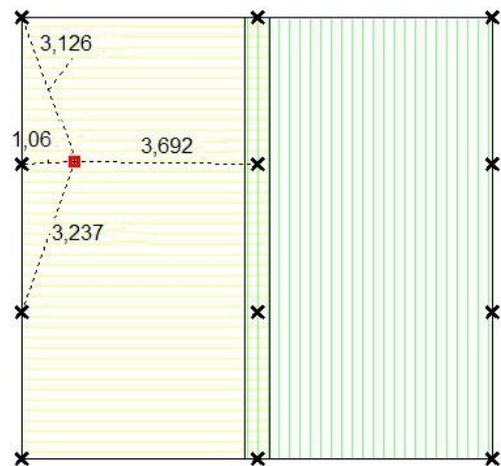


Abbildung 92

Ein engeres Gitter als Basis für die Bestimmung der lokal erreichbaren Wiedergabe wird die Resultate der Korrektur beeinflussen. Theoretisch wird ein engeres Gitter den Mittelwert der Luminanz erhöhen, jedoch zu einer größeren Standardabweichung führen. Abbildung 93 bestätigt dies. Abbildung 89 ist etwas dunkler, wirkt jedoch homogener. Beim Vergleich der Fotografie (Abbildung 94) ist dieser Trend schwerer auszumachen. Der intensive Vergleich mit Abbildung 90 zeigt jedoch zumindest die höhere Luminanz in Teilen der Projektion.

Interpolation über drei nächsten Knotenpunkte (Kreuze). Roter Pixel hat drei nächste Nachbarn in einer vertikal verlaufenden Linie.



Abbildung 93

Testbild weiße Fläche nach Vorbehandlung mit Sigmoid und zugehöriger Ergänzungsfunktion und Korrektur mit lokal ausgerichteter LAM auf Basis eines 18x6 Gitters.



Abbildung 94

Testbild Fotografie nach Vorbehandlung mit Sigmoid und zugehöriger Ergänzungsfunktion und Korrektur mit lokal ausgerichteter LAM auf Basis eines 18x6 Gitters.

Statistisch lässt sich die neue Situation ebenfalls nachvollziehen. Der Mittelwert der Luminanz liegt nun bei 66,2, während die Standardabweichung von dieser Luminanz 2,5, also rund 3,8% beträgt. Die Korrektur hat lokaleren Bezug. Während sich der linke Projektor auf Basis des 6x4 Gitters über seine gesamte Projektorfläche an den folgenden, dunkleren Projektor fließend annäherte, prägt nun der helle Hotspot im zentralen Projektorfeld die Korrektur dieses Projektors. Die Charakteristik nach der Vorbehandlung (Abbildung 85) wurde weniger stark verändert.

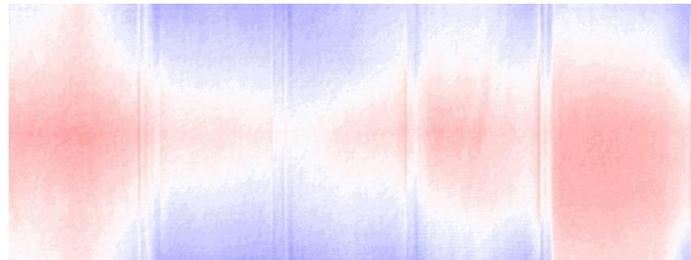


Abbildung 95

*Aufbereitete Darstellung von Abbildung 93
 Durchschnittliche Luminanz (66,2): Weiß
 Umso dunkler desto blauer, umso heller: desto roter.*

Die Intention der Korrektur und die vorliegende Situation beeinflussen die Wahl des Gitters. Globale Zielsetzung bedingt ein weites Gitter, während lokale Zielsetzung ein engeres Gitter erlaubt. Sind die Darstellungen der verwendeten Projektoren untereinander weitestgehend homogen, kann das Gitter enger gelegt werden; umso heterogener diese jedoch sind, umso größer ist die Priorität die globale Uniformität zu verbessern.

4.1.5. Lokal gewichtete Optimierung

In 4.1.4 wurde bereits gezeigt, dass eine lokale Gewichtung durch die Definition eines entsprechenden Gitters durchgeführt werden kann. Somit erscheint es nicht mehr nötig, lokal und global optimierende LAMs gewichtet zusammenzuführen. Da zudem in den durchgeführten Tests keine dramatisch größere Standardabweichung vom Mittelwert bei engeren Gittern

gegenüber der globalen Optimierung vorgefunden wurde, scheint hier nur geringes Optimierungspotenzial zu bestehen. Allerdings kann durch die Zusammenführung erreicht werden, dass sich auch Projektoren, die weit voneinander angeordnet sind (bspw. ganz links und ganz rechts) annähern. Dies ist bei lokaler Optimierung nur mit einem horizontal sehr weit gesteckten Gitter möglich (maximal 3 gleichmäßig verteilte Knoten in der Breite).

Abbildung 96 zeigt Luminanzen zwischen der lokalen und globalen Korrektur (Abbildung 86 und Abbildung 89). Der helle Bereich in der Mitte mit Abfall Richtung der oberen und unteren Leinwandbegrenzung bei der lokalen Korrektur, ist nur noch zu erahnen. Bei homogenen Inhalten ist dies ein relevanter Faktor, bei heterogenen Inhalten nicht. Abbildung 97 verdeutlicht dies. Im Vergleich mit Abbildung 87 und Abbildung 90 wirkt die zuletzt genannte Variante der Fotografie subjektiv am besten für den Betrachter.



Abbildung 96

Testbild weiße Fläche nach Vorbeh. mit Sigmoid und zugehöriger Ergänzungsfkt. und Korrektur mit gleichgewichteter Kombination aus global ausg. LAM und lokal ausg. LAM auf Basis eines 6x4 Gitters.



Abbildung 97

Testbild Fotografie nach Vorbehandlung mit Sigmoid und zugehöriger Ergänzungsfunktion und Korrektur mit gleichgewichteter Kombination aus global ausg. LAM und lokal ausg. LAM auf Basis eines 6x4 Gitters.

Abbildung 98 zeigt die aufbereitete Darstellung der weißen Fläche, wenn globale und lokale Korrektur mit 8x4 Gitter gleich gewichtet werden. Da der rechte Projektor in beiden „Reinformen“ dunkler als der Durchschnitt war, bleibt dieser auch nach der gewichteten Korrektur dunkler. Interessant ist, dass die lokale Korrektur die Fehler der globalen Korrektur mindert. Das ist zum Teil sicher Zufall, liegt aber auch daran, dass die schwächere lokale Korrektur grundsätzlich geringere Fehleranfälligkeit aufweist. Der Mittelwert der Luminanz liegt mit 63 zwischen den „Reinformen“ (61,6 und 65,1). Die Standardabweichung vom Mittelwert beträgt jedoch nur noch 1,9, also etwa 3%. Bei ausschließlicher Wertung der Standardabweichung, ist diese Variante die beste, weil statistisch homogenste.

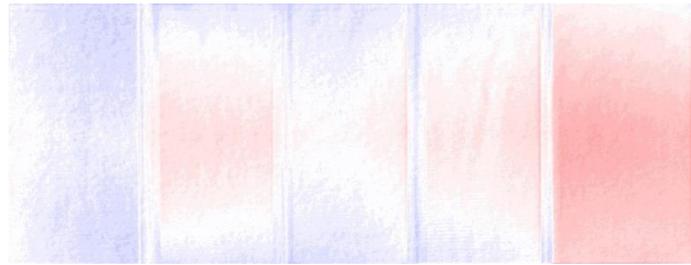


Abbildung 98

Aufbereitete Darstellung von Abbildung 96

Durchschnittliche Luminanz (63): Weiß

Umso dunkler desto blauer,

umso heller: desto roter.

4.1.6. Kanten-Paradoxon

Nach der Vorbehandlung sehen die Übergänge zwischen den Projektorfeldern fließend aus, sind in einem Zustand, der durchaus akzeptabel ist. Nach der eigentlichen Korrektur des gesamten Systems, ist der Eindruck jedoch ein anderer. Abbildung 99 veranschaulicht, dass durch die eigentliche Korrektur dominante Strukturen im überlappenden Bereich entstehen. Helle und dunkle Streifen führen zu einem heterogenen Eindruck.

Die Ursache des Fehlers liegt einerseits sicher in ungenauer Rekonstruktion des Luminanz-Surface im Kamera-Raum, andererseits aber auch in der falschen Annahme von

$$\forall a, b: (a + b) = c \rightarrow \beta * a + \beta * b = \beta * c$$

Arithmetisch ist die Annahme richtig, jedoch nicht wenn die Zusammenhänge zwischen Projektor-Input, -Output und -Überlagerung betrachtet werden. Zu einem Projektor-Input a lässt sich mittels Algorithmus $sum100(a)$ ein Projektor-Input b bestimmen, so dass die Überlagerung auf den Betrachter den Eindruck eines einzelnen Projektors mit Input 100 ($=c$) macht. Wird „ $=$ “ auf diese Weise definiert, gilt $a + b = c$. Durch Korrektur soll c nun auf c' angepasst werden. In der LAM wird deshalb der Faktor $\beta = \frac{c'}{c}$ eingetragen. Das Ergebnis der Korrektur wird stimmen, wenn ein einzelner Projektor auf den korrigierten Bereich projiziert. Wenn jedoch zwei Projektoren beteiligt sind und c aus der Überlagerung von a und b resultiert, werden a, b mit dem Faktor β multipliziert und die Annahme $\beta * a + \beta * b = c'$ gilt nicht.

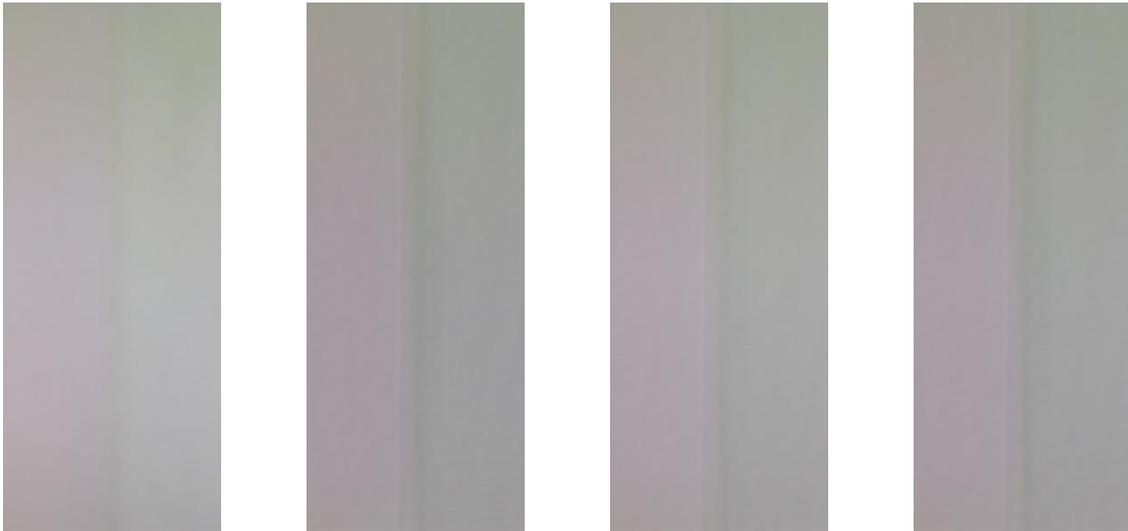


Abbildung 99

Übergang zwischen dem dritten und vierten Projektorfeld von links.

1.v.L.: Nach der Vorbehandlung überlappender Bereiche mit Sigmoid und Ergänzungsfunktion

2.v.L.: Nach Vorbehandlung und globaler Korrektur

3.v.L.: Nach Vorbehandlung und lokaler Korrektur auf Basis eines 6x4-Rasters

4.v.L.: Nach Vorbehandlung und gleichgewichteter Kombination der lokalen und globalen Korrektur

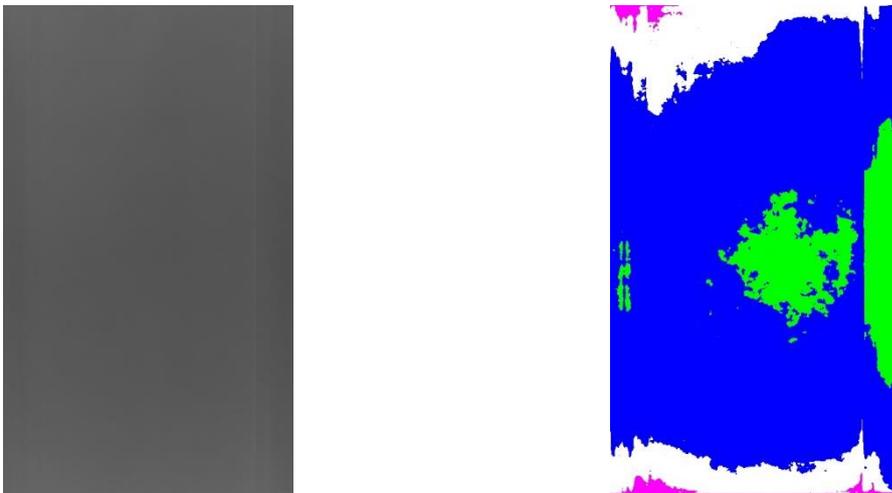


Abbildung 100

Links: Projektor-LAM des mittleren Projektors, die bei Abbildung 99 (2.v.L.) verwendet wurde, wobei die Vorbehandlung der überlappenden Bereiche noch zur LAM hinzu zufügen ist.

Rechts: Faktoren der LAM durch Färbung visualisiert:

< 65% → Schwarz

< 75% → Rot

< 85% → Grün

< 95% → Blau

≥ 95% → Weiß

exakt 100% → Rosa

Faktoren bis zu etwas 0,7 bringen besonders hohe Abweichungen bis über 7% (Differenz von $map(a, b)$ zum Erwartungswert c'). Faktoren bis 0,8 bringen noch regelmäßig Abweichungen von 4-5% und Faktoren bis 0,9 von 3-4%. Über 0,9 treten Abweichungen mit bis zu 1,5% auf, in der Regel unter 1%. Die Abweichungen treten in der überwiegenden Menge nach unten auf und erscheinen in unregelmäßigen Abständen, dann aber oft in einem Abschnitt in Häufung. Abbildung 100 zeigt, dass mit Abweichungen im überlappenden Bereich von 4-5% zu rechnen ist (hauptsächlich grün und blau am rechten Rand).

4.1.6.1. Auflösung des Kanten-Paradoxon

Die Korrektur in den überlappenden Bereichen ist fehlerfrei möglich, wenn geräteunabhängige Messungen der Wiedergabe auf der Leinwand zu jedem Projektor-Input (idealerweise für jeden Pixel einzeln) durchgeführt werden. Damit ist tatsächlich für jeden Pixel die Luminanz der Darstellung gezielt zu steuern. Das verwendete Verfahren ist jedoch abhängig von der eingesetzten Kamera und bestimmt nicht die Luminanz auf der Leinwand, sondern den Input, der mutmaßlich zur beobachteten Luminanz führte (siehe 3.1.2). Dieses Verfahren stößt an überlappenden Bereichen an seine Grenzen.

Eine Alternative besteht darin, in den überlappenden Bereichen auf eine auf Messergebnisse gestützte Korrektur zu verzichten und Verläufe zu erzeugen, die in der Überlagerung zur allgemein erreichbaren Wiedergabe führen. Das Verfahren aus 3.1.1 wird dahingehend modifiziert, dass die überlagerte Darstellung nicht 100 erreicht, sondern die allgemein erreichbare Wiedergabe. Aus dem Sigmoid $f(x) = \frac{221}{1 + e^{\frac{x}{100} - 0.5}}$ wird

$$f(x, l_{min}) = \frac{l_{min}}{100} * \frac{221}{1 + e^{\frac{x}{100} - 0.5}}$$

Damit verläuft die Kurve im Bereich $0 \leq x \leq 300$ zwischen 0 und der allgemein erreichbaren Wiedergabe l_{min} . In 3.1.3.2 wurde angemerkt, dass der Algorithmus $sum100(a)$ mit parametrisierter Zielsumme zu implementieren ist. $sum(a, c)$ ermittelt zu Input a den Input, mit dem in der Überlagerung Input c ersetzt wird. Diese Implementierung wird verwendet, um die Ergebnisse der Ergänzungsfunktion f^* zu bestimmen.

$$f^*(x) = sum(f(x, l_{min}), l_{min})$$

Mit $f(x)$, $f^*(x)$ werden zwei Verläufe definiert, die in der Überlagerung die allgemein erreichbare Wiedergabe erzeugen.

Bei Korrektur mittels lokaler Optimierung muss, statt der einmal zu bestimmenden allgemein erreichbaren Wiedergabe, zu jedem Pixel der Wert des korrespondierenden Pixels aus der Karte der lokal erreichbaren Wiedergaben bestimmt werden. Da diese Karte in der Implementierung nur im Kameraraum vorliegt, muss analog zur Gewinnung der Projektor-LAMs (siehe

3.2.3) in die Projektorräume transformiert werden um die relevanten Bereiche zu identifizieren.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Anwendung des Verfahrens aus [5, 6] auf das Multi-Projektor-System der Universität Stuttgart bedurfte Modifikationen. Während das Verfahren auf, mittels weiteren Messgeräten gewonnenen, Linearisierungen von Messdaten baute, musste durch die Beschränkung auf eine Digitalkamera, eine Anpassung durchgeführt werden. Das modifizierte Verfahren schließt vom Kamerabild auf den Projektor-Input (siehe 3.1.2). Eine weitere Modifikation eliminierte den Displayraum aus dem Verfahren um Unsicherheiten über die tatsächliche Ausrichtung der Projektorfelder von der Korrektur fern zu halten.

Neben der global optimierenden Korrektur wurde eine Möglichkeit erarbeitet, die Korrektur lokal zu gewichten (siehe 3.1.4) und die Dynamik des Projektors durch kleinere Anpassungen besser auszunutzen. Die Auswertung der verschiedenen Möglichkeiten zur Priorisierung von lokaler und globaler Homogenität (siehe 4.1) zeigte schließlich, dass über die Definition des Gitters zur Bestimmung lokal erreichbaren Wiedergaben, eine gute „Einstellmöglichkeit“ des Verhältnisses der beiden Ausrichtungen besteht. Eine mögliche Verbesserung könnte erreicht werden, indem eine unregelmäßige Verteilung der Gitterknoten implementiert wird. Dies muss eine weitergehende Implementierung zeigen.

Bei der Evaluierung der Ergebnisse des Verfahrens wurde festgestellt, dass überlappende Bereiche eine Form der Luminanz-Unterschiede erzeugen, die mit dem Verfahren nicht befriedigend aufgelöst werden können (siehe 4.1.6). Eine Lösung für diese Bereiche wurde in 4.1.6.1 vorgeschlagen.

Auch wenn das zu korrigierende Problem die Luminanz-Unterschiede waren, viel doch auf, dass Abweichungen der Chromatizität den Eindruck eines nahtlosen Displays schmälern (siehe bspw. Abbildung 86, Abbildung 89, Abbildung 93, Abbildung 96). Die in 2.1 zusammengefassten Forschungen aus [4] stehen dabei teilweise im Widerspruch zur Situation des Multi-Projektor-Systems der Universität Stuttgart. Die zeitliche Konstanz der Chromatizität von Projektoren ist nicht zu beobachten. Viel mehr ist ein deutlicher Einfluss der Betriebszeit von Projektorlampen auf die Chromatizität auszumachen. Das System zeigt heterogenes Verhalten zwischen den eingesetzten Projektoren. Bei hellen, monotonen Inhalten stört dies die Wahrnehmung als nahtloses Display relevant. Basierend auf diesem Eindruck ist es nötig, ein Verfahren zu entwickeln, das Chromatizität und Luminanz korrigiert, oder zumindest die Chromatizität in einem eigenständigen Prozess anpasst.

Das in 2.3 vorgestellte Verfahren aus [5, 6] unterliegt dem Dilemma, dass es Homogenität im Austausch von Dynamik erhält. Das helle, heterogene System wird zu einem dunkleren, homogeneren System. Umso größere Schwankungen über das Display verteilt auftreten, umso stärker ist die Korrektur. Der dunkelste Bereich des Displays bestimmt die Dynamik des korrigierten Systems. Die Konsequenz dieses Umstands ist dramatisch. Ein System das Korrektur besonders nötig hat, wird besonders dunkel. Es stellt sich die Frage nach der Daseinsberechtigung des Verfahrens. Vignettierungen sind typisch für Projektoren, zu geringe Helligkeit ein gängiges Problem. Denkt man an mögliche Einsatzszenarien, bleiben großflächige Anwendungen jenseits abgedunkelter Räumlichkeiten kritisch. Dynamik ist bei Projektoren zu kostbar um durch die Homogenisierung weiter verringert zu werden, zumindest im vom Verfahren verursachten Umfang.

Eine lokale Orientierung der Korrektur ist ein Kompromiss aus verringerter Dynamik und globaler Homogenität. Der Verzicht auf die allgemein erreichbare Wiedergabe als Grundlage der Korrektur zugunsten einer Karte lokal erreichbarer Wiedergaben, erlaubt eine anwendungsbezogene Abwägung von Homogenität und Dynamik. Sicher gibt es Szenarien in denen eine globale Korrektur den besten Eindruck für den Betrachter erzeugt, typischer sind jedoch Szenarien in denen der Korrektur von Helligkeitsunterschieden geringere Priorität als der Dynamik des gesamten Systems eingeräumt werden kann. Die Möglichkeit den globalen Bezug der Korrektur allein durch die Definition des Gitters zur Bestimmung der Karte lokal erreichbarer Wiedergaben zu steuern, reicht schon aus, die richtige Korrektur für verschiedenste Domänen zu bestimmen.

Ein nur unbefriedigend gelöstes Teilproblem stellen die Bereiche überlagerter Projektionen dar. Es ist zweifelhaft, ob das Verfahren, egal ob global oder lokal priorisiert, das Problem löst. Eine Alternative gibt es jedoch. In 4.1.2 wurde gezeigt, dass die überdachte Erzeugung von Gradienten durch Funktion und Ergänzungsfunktion gute Ergebnisse erreichen kann. Wenn diese Gradienten fließend in die Korrektur umgebender Bereiche übergehen, sind – theoretisch – bessere Resultate möglich. Die Bestimmung der Gradienten wird zu einem komplexeren Problem, womöglich sind für jeden Pixelzug quer durch die überlagerten Bereiche individuelle Verläufe zu berechnen. Bei System mit mehreren Projektoren in Breite und Höhe sind überlappende Bereiche mit bis zu vier beteiligten Projektoren möglich. Hierfür passende Gradienten zu berechnen, wird noch komplexer. Eine Korrektur überlappender Bereiche nur durch das in 2.3.1 vorgestellte Verfahren (ohne Vorbehandlung) braucht pixelgenaue Rekonstruktion des Luminanz-Surface des Displays und pixelgenaue Zuordnung des Displayraums zu den Projektorräumen. Das Verfahren unterliegt dabei dem Dilemma technischen Fortschritts. Mit einer aktuellen Vollformat-Kamera, bspw. der Nikon D800, kann man die von [5, 6] verwendeten Multi-Projektor-Systeme praktisch pixelgenau erfassen, rekonstruieren, detailliert korrigieren und dabei das Abtasttheorem [19] durchweg erfüllen. Nur gab es nicht allein im Kamera-Sektor Entwicklungen, sondern ebenso in den Implementierungen dieser Multi-Projektor-Systeme. Das System, das Grundlage der Auswertungen in 4.1 bildete, hat

eine Auflösung von 10800x4096 Pixel. Somit ist, auch wegen der besonders weiten Ausbreitung des Systems in der Breite, wieder keine pixelgenaue Korrektur möglich. Theoretisch lässt sich diese doch durch verschiedene Aufnahmen mit größerer Brennweite und Ausrichtung auf jeweils ein Projektorfeld gewinnen. Somit ergeben sich zwei mögliche Verfahren, mit denen die Korrektur von Schwankungen der Luminanz über das Display korrigiert werden können. Dies ist (1) der fließende Übergang berechneter Übergänge in überlagerten Bereichen in die Korrektur mittels LAMs und (2) die Korrektur auf Basis einer pixelgenauen Zuordnung.

Literaturverzeichnis

6. References

- [1] D. A. Kerr, "The CIE XYZ and xyY Color Spaces," Issue 1, Mar. 2010.
- [2] Tao Ni, G. S. Schmidt, O. G. Staadt, M. A. Livingston, R. Ball, and R. May, "A Survey of Large High-Resolution Display Technologies, Techniques, and Applications," in *Virtual Reality Conference, 2006*, 2006, pp. 223–236.
- [3] M. Hereld, I. R. Judson, and R. L. Stevens, "Introduction to building projection-based tiled display systems," *Computer Graphics and Applications, IEEE*, vol. 20, no. 4, pp. 22–28, 2000.
- [4] A. Majumder and R. Stevens, "Color nonuniformity in projection-based displays: analysis and solutions," *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 2, pp. 177–188, 2004.
- [5] M. Brown, A. Majumder, and Ruigang Yang, "Camera-based calibration techniques for seamless multiprojector displays," *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 2, pp. 193–206, 2005.
- [6] A. Majumder and Rick L. Stevens, "LAM: Luminance Attenuation Map for Photometric Uniformity in Projection Based Displays," pp. 147–154, <http://portal.acm.org/citation.cfm?id=585765>, 2002.
- [7] E. Hecht, *Optik*: Oldenbourg, 2005.
- [8] Anonymus and J. G. Dingler, "Die Abnahme der Lichtstärke mit dem Quadrate der Entfernung; von Carstädt," *Polytechnisches Journal*, vol. 214, p. 343, 1874.
- [9] M. Tkalcic and J.F. Tasic, Eds, *Colour spaces: perceptual, historical and applicational background. EUROCON 2003. Computer as a Tool. The IEEE Region 8*, 2003.
- [10] M. C. Stone, "Representing colors as three numbers [color graphics]," *Computer Graphics and Applications, IEEE*, vol. 25, no. 4, pp. 78–85, 2005.
- [11] Bruce Lindbloom, *RGB/XYZ Matrices*. Available: http://brucelindbloom.com/index.html?Eqn_RGB_XYZ_Matrix.html.
- [12] A. Ford and A. Roberts, "Color Space Conversions," Aug. 1998.
- [13] P. Debevec and J. Malik, "Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs," in *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques (SIGGRAPH '97)*, 1998, pp. 369–378.
- [14] M. Hereld, I. R. Judson, and R. Stevens, "DottyToto: A measurement engine for aligning multi-projector display systems,"
- [15] H. Kaufmann and H. Steffen, *Strabismus*: Thieme, 2012.
- [16] C. Harris and M. Stephens, "A Combined Corner and Edge Detector," in *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*, 1988, pp. 147–151.
- [17] J. Shi and C. Tomasi, "Good features to track," in *Computer Vision and Pattern Recognition, 1994. Proceedings CVPR '94, 1994 IEEE Computer Society Conference on*, 1994,

pp. 593–600.

- [18] A. Criminisi, I. Reid, and A. Zisserman, “A Plane Measuring Device,” in Proceedings of the 8th British Machine Vision Conference, Colchester, UK, 1997.
- [19] H. Nyquist, “Abridgment of certain topics in telegraph transmission theory,” A.I.E.E., Journal of the, vol. 47, no. 3, pp. 214–217, 1928.

Erklärung

Ich versichere, diese Arbeit selbstständig verfasst zu haben.

Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommene Aussagen als solche gekennzeichnet.

Weder diese Arbeit noch wesentliche Teile daraus waren bisher Gegenstand eines anderen Prüfungs-verfahrens.

Ich habe diese Arbeit bisher weder teilweise noch vollständig veröffentlicht.

Das elektronische Exemplar stimmt mit allen eingereichten Exemplaren überein.

Stuttgart, den 23. Oktober 2014 _____