

Untersuchung der Problematiken beim stereoskopischen Rendern

Bachelorarbeit

zur Erlangung des Grades eines Bachelor of Science (B.Sc.)
im Studiengang Computervisualistik

vorgelegt von
Thomas Kipshagen

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Müller
(Institut für Computervisualistik, AG Computergraphik)
Zweitgutachter: Dipl.-Inf. Martin Schumann
Institut für Computervisualistik, AG Computergrafik

Koblenz, im September 2012

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ja Nein

Mit der Einstellung der Arbeit in die Bibliothek bin ich einverstanden.

Der Veröffentlichung dieser Arbeit im Internet stimme ich zu.

.....
(Ort, Datum)

.....
(Unterschrift)

Zusammenfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit einigen Problemen, die beim Rendern von stereoskopischen Inhalten auftreten können. Die Probleme werden dabei mit Hilfe eines selbstentwickelten Programms simuliert und von einer Gruppe von Testpersonen bewertet. Dabei soll festgehalten werden, wie stark die Fehler wahrnehmbar sind und welchen Einfluss sie auf den 3D-Eindruck haben. Des Weiteren soll untersucht werden, ob die verschiedenen Kameraanordnungen einen Einfluss auf die Wahrnehmung des 3D-Eindrucks und des Fehlers haben.

Abstract

This thesis deals with problems, which occur when rendering stereoscopic contents. These problems are elaborated, simulated with the help of a program developed in this thesis and evaluated by a group of volunteers. Thereby it shall be determined, whether the errors are noticeable and how much they influence the 3D effect of the stereoscopic images. Each error is simulated using different camera assemblies and evaluated depending on the chosen assembly.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Ziel der Arbeit	1
3	Grundlagen	1
3.1	Allgemeines	1
3.2	Stereoskopische Grundbegriffe	2
3.2.1	Interaxiale Separation	2
3.2.2	Stereoskopische Parallaxe	3
3.2.3	Kameraanordnung	4
3.3	Stereo-Ausgabe	7
3.3.1	Anzeigeverfahren	7
3.3.2	Bildformate	8
3.3.3	Grundlegende Problematik	9
3.4	Problematiken des stereoskopischen Renderns	9
3.4.1	Crosstalk	9
3.4.2	Individuelle Fehler	10
3.4.3	Divergente Parallaxe	10
3.4.4	Stereo Violation	10
3.4.5	Shadowmaps	11
3.4.6	Depth Aliasing	12
3.4.7	Fusion Failure	12
3.4.8	Größenverhältnis	12
4	Stereo-Programmierung	12
4.1	Umsetzung	12
4.2	Implementierung	13
5	Evaluation und Ergebnis	16
5.1	Testsystem	16
5.2	Testaufbau	16
5.2.1	Fusion Failure	17
5.2.2	Größenverhältnis	18
5.2.3	Crosstalk	18
5.2.4	Divergente Parallaxe	19
5.2.5	Großer Konvergenzwinkel	19
5.2.6	Keine positive Parallaxe	19
5.2.7	Stereo Violation	20
5.2.8	Shadowmaps	20
5.2.9	Depth Aliasing	20
5.2.10	Normale Szenen	21
5.3	Testergebnisse	22

5.3.1	Kameraabstand	22
5.3.2	Objektverschiebung (Größenverhältnis)	22
5.3.3	3D-Eindruck	24
5.3.4	Fehlerhafte Darstellung	25
5.3.5	Objektlage (Keine positive Parallaxe)	28
5.3.6	Objektlage (Depth Aliasing)	30
6	Fazit und Ausblick	31
	Literatur	33
	Anhang	i

Abbildungsverzeichnis

1	Parallaxen	3
2	Kameraanordnung: Toe-In	5
3	Kameraanordnung: Parallel	6
4	Kameraanordnung: Frustum-Shift	6
5	Bildformate	8
6	Fenstersicht	10
7	Depth Aliasing	11
8	Aufbau	16
9	Szenenaufbau: Fusion Failure	17
10	Szenenaufbau: Größenverhältnis	17
11	Szenenaufbau: Crosstalk	18
12	Szenenaufbau: Divergente Parallaxe	18
13	Szenenaufbau: Individueller Fehler	19
14	Szenenaufbau: Stereo Violation	19
15	Szenenaufbau: Shadowmaps	20
16	Szenenaufbau: Depth Aliasing	20
17	Diagramm: Kameraabstand	21
18	Diagramm: Objektverschiebung	23
19	Diagramm: 3D Eindruck- allgemeiner Durchschnitt	24
20	Diagramm: 3D Eindruck- geschlechtsspezifische Durchschnitte	25
21	Diagramm: Fehler- allgemeiner Durchschnitt	26
22	Diagramm: Fehler- geschlechtsspezifische Durchschnitte	27
23	Szenenaufbau: zweite normale Szene	27
24	Szenenaufbau: erste normale Szene	27
25	Diagramm: Fehler - 3D Eindruck	29
26	Diagramm: Objektlage	30

1 Einleitung

Mit Kino-Filmen wie *Avatar-Aufbruch nach Pandora* oder dem Animationsfilm *Oben* erlebte stereoskopisches 3D seinen lang erwarteten Durchbruch. Neben den Filmen trugen auch die Vereinfachung der Technik und die Möglichkeiten der modernen Computergrafik zu diesem Erfolg bei.

Neben dem Kino erhält stereoskopisches 3D auch auf anderen Wegen Einzug in den Unterhaltungsalltag. Im heimischen Wohnzimmer erfolgt die stereoskopische Ausgabe durch 3D-Fernseher und 3D-Monitor. Die entsprechenden Inhalte kommen dabei vorwiegend von 3D-Blu-rays, aber auch einige Fernsehsender bieten bereits 3D-Inhalte an. Auch für Videospiele wird mit Konsolen wie der *Sony Playstation 3* und dem *Nintendo 3DS* die stereoskopische Wiedergabe ermöglicht. Bei Computern hingegen bietet die *Nvidia 3D Vision*- und *AMDs HD3D*-Technologie oder Middleware von anderen Herstellern die passenden Möglichkeiten an [Wol11]. Besonders in diesen letzten beiden Bereichen spielt die Erzeugung von stereoskopischen Inhalten in Echtzeit eine wichtige Rolle. Die Leistungsreserven von moderner Hardware sind dabei ausreichend, um trotz doppelter Anzeige im Normalfall genügend Bilder zu liefern.

2 Ziel der Arbeit

Obwohl sich die Technologien zur Erzeugung als auch zur Wiedergabe von stereoskopischen Inhalten weiterentwickelt haben, sind sie immer noch fehleranfällig. Dies betrifft sowohl Problematiken bezüglich der Ausgabe der gerenderten Bilder, als auch das Rendern selbst. Ziel dieser Arbeit ist es, einige dieser Problematiken zu untersuchen. Dazu werden die in dieser Arbeit erläuterten Fehler mit einem eigens entwickelten stereoskopischen Rendingsystem bewusst simuliert. In einer Testreihe wird der Einfluss der fehlerhaften Bilder auf den stereoskopischen Gesamteindruck von Frauen und Männern überprüft und die Ergebnisse werden miteinander verglichen. Dabei soll untersucht werden, wie stark die Testpersonen unterschiedliche Fehler wahrnehmen. Darüber hinaus soll die Wirkung der Kameraanordnung auf die unterschiedlichen Problematiken innerhalb der Testszenarien analysiert und ihr Einfluss eingeschätzt werden.

3 Grundlagen

3.1 Allgemeines

Zum menschlichen Sehen werden zwei Augen verwendet. Dies wird als Binokularesehen bezeichnet. Aufgrund der Lage der beiden Augen kommt es zu einer Überlappung der Sichtbereiche. Durch die Überlappung sind in diesem Bereich Stereo-3D Informationen vorhanden. Diese sind besonders wichtig

für die Tiefeneinschätzung im Nahbereich. [B197]

Damit es beim menschlichen Sehen nicht zu Doppelbildern kommt, fusioniert das Gehirn die Teilbilder der beiden Augen zu einem mittig liegenden Gesamtbild. Das Gesamtbild ergibt sich dabei aus den Mittelwerten, die das visuelle Zentrum aus den beiden Teilbildern errechnet. Dies führt ebenfalls dazu, dass die wahrgenommene Tiefe, Farben und auch Helligkeiten ausgeglichen werden. Die Fusion der beiden Teilbilder funktioniert jedoch nur in einem gewissen Toleranzbereich. Das Überschreiten des Toleranzbereiches führt zu einer zunehmenden visuellen Überforderung. Dies kann sich in brennenden Augen bis zur deutlichen Überanstrengung der Augenmuskeln äußern. [B197]

Besonders künstlich erzeugte Stereo-3D-Effekte können zu einer solchen Überforderung führen. Im Gegensatz zur menschlichen Wahrnehmung wird beim stereoskopischen Sehen nur eine Bildebene betrachtet und nicht der gesamte Raum abgetastet. Daher muss bei der Erzeugung der stereoskopischen Bilder auf einige Besonderheiten geachtet werden. [B197]

Im Nachfolgenden sollen zunächst einige Grundbegriffe der Stereoskopie erläutert werden. In Kapitel 3.3 werden die eingesetzten Anzeigeverfahren und Bildformate gegenübergestellt. Abschließend werden die Probleme, die speziell beim stereoskopischen Rendern vorkommen, erklärt.

3.2 Stereoskopische Grundbegriffe

3.2.1 Interaxiale Separation

Für die Erzeugung des stereoskopischen Effektes werden zwei Kameras benötigt. Diese liegen zum einem auf einer gemeinsamen, horizontal verlaufenden optischen Achse. Zum anderen besitzen die Kameras einen gewissen Abstand voneinander, der als interaxiale Separation bezeichnet wird. Die Größe der interaxialen Separation hat direkten Einfluss auf den stereoskopischen Effekt. [Aut08, Cla10, B197] Das Verkleinern des Kamerabstands bewirkt eine Reduzierung des Tiefeneindrucks. Dies spiegelt sich im Verflachen der Objekte wieder. Dieser Effekt wird als Hypostereoskopie oder Cardboarding bezeichnet. [Aut08, Cla10, B197]

Mit der Vergrößerung der Interaxialen Separation kann der Tiefeneindruck verstärkt werden. Sobald die interaxiale Separation dabei den Abstand zwischen den Augen überschreitet, entsteht ein übertriebener Tiefeneindruck. Diese Wirkung wird als Hyperstereoskopie bezeichnet. [Aut08, Cla10, B197] Die Größe und das Seitenverhältnis des Ausgabegeräts sowie der Abstand zum Betrachter haben einen direkten Einfluss auf die interaxiale Separation. Eine Änderung dieser äußeren Faktoren ohne die Anpassung des Kameraabstandes kann zu kritischen Fehlern führen; beispielsweise ist eine divergente Parallaxe (siehe Kapitel 3.2.2) möglich.

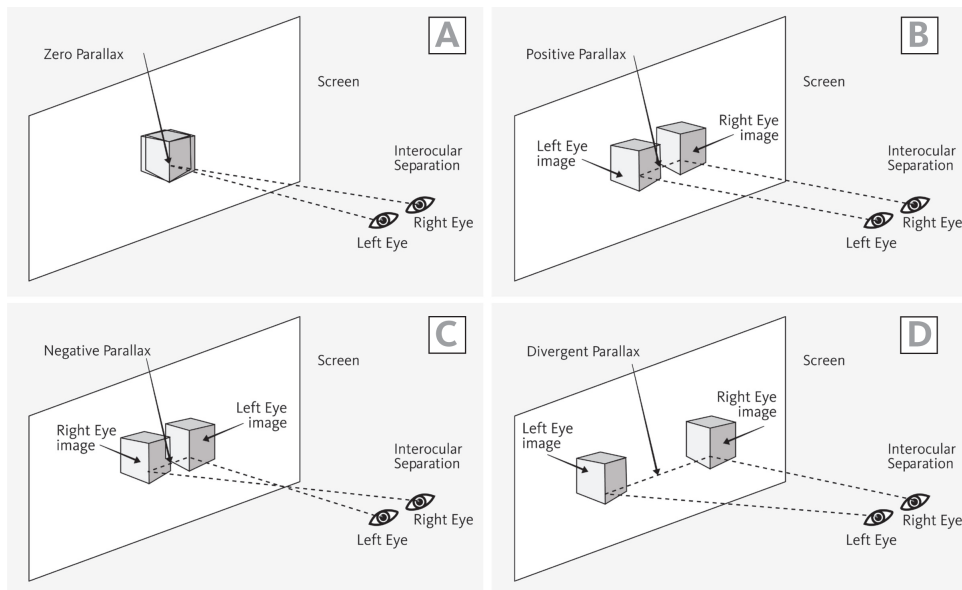


Abbildung 1: Darstellung der verschiedenen Parallaxen: (A) Null Parallaxe, (B) Positive Parallaxe, (C) Negative Parallaxe, (D) Divergente Parallaxe [Quelle: [Aut08]]

3.2.2 Stereoskopische Parallaxe

Die unterschiedliche Lage der korrespondierenden Bildpunkte in den Augen wird als stereoskopische Parallaxe bezeichnet. Sie resultiert in ungleichen Tiefeneindrücken des linken und rechten Bildes. Es wird zwischen vier verschiedenen Parallaxen unterschieden, die die Lage des betrachteten Punktes in Abhängigkeit zur Bildebene beschreiben: Null Parallaxe, Positive Parallaxe, Negative Parallaxe und divergente Parallaxe. Die verschiedenen Parallaxen werden in den folgenden Abschnitten genauer erklärt. [B197, R009, Aut08, Cla10, Gei06, Pla11, Müb, Tau10]

Null Parallaxe

Bei der Null Parallaxe findet keine Verschiebung des Punktes in Abhängigkeit zur Bildebene statt, weder für das linke noch für das rechte Auge. Der betrachtete Punkt befindet sich hierbei auf der Bildebene. (Abbildung 1A) [B197, Aut08, Cla10, Tau10]

Negative Parallaxe

Im Fall der negativen Parallaxe befindet sich der Punkt vor der Bildebene. Dieser Eindruck entsteht, da sich die beiden Sichtachsen des linken beziehungsweise des rechten Auges bereits vor der Projektionsebene schneiden. Dadurch wird der Punkt im linken Bild zu weit nach rechts und entsprechend im rechten Bild zu weit nach links abgebildet. Bei der negativen Par-

allaxe muss darauf geachtet werden, dass die Verschiebung des Punktes auf der Bildebene nicht größer als die interaxiale Separation wird, um einen übertriebenen Tiefeneindruck zu vermeiden. (Abbildung 1B) [B197, Aut08, Cla10, Tau10]

Positive Parallaxe

Bei der positiven Parallaxe befindet sich der betrachtete Punkt hinter der Bildebene. Der Punkt wird im linken Bild zu weit links und im rechten Bild zu weit rechts abgebildet. Die optischen Achsen nähern sich mit wachsender Entfernung des Punktes einem parallelen Verlauf an. Ein paralleler Verlauf der optischen Achsen kommt zustande, wenn ein Punkt im Unendlichen liegt. In diesem Fall entspricht der Abstand des Punktes im linken Bild zum abgebildeten Punkt im rechten Bild der interaxialen Separation. Insgesamt ergibt sich daraus, dass die Verschiebung der Punkte bei der positiven Parallaxe kleiner oder gleich dem Abstand der interaxialen Separation ist. (Abbildung 1C) [B197, Aut08, Cla10, Tau10]

Divergente Parallaxe

Die divergente Parallaxe ist ein Sonderfall, bei dem die Verschiebung eines Punktes zwischen dem linken und rechten Bild größer wird als die interaxiale Separation. Der Schnittpunkt der beiden optischen Achsen liegt hinter den beiden Kameras. Bei diesem Sonderfall versuchen beide Augen zeitgleich nach außen zu gucken, um den Punkt zu erfassen. Da es sich hierbei um eine unnatürliche Augenbewegung handelt, ist sie für den Betrachter häufig störend oder sogar unangenehm. [B197] (Abbildung 1D)

3.2.3 Kameraanordnung

Neben dem Abstand der Kameras spielt auch deren Anordnung eine entscheidende Rolle für den stereoskopischen Effekt. In der Computergrafik gibt es drei verschiedene Anordnungsmöglichkeiten, die in den folgenden Abschnitten näher erklärt werden. [Tau10, Aut08]

Toe-In

Bei der Toe-In Anordnung sind die Kameras zueinander gerichtet und fokussieren einen gemeinsamen Punkt (Abbildung 2). Diese Art der Kameraanordnung kommt dem menschlichen Sehen am nächsten. Der Bildbereich, in dem Stereosehen ermöglicht wird, fällt hierbei größer aus als bei der nachfolgend erklärten parallelen Anordnung. Zudem können sich Objekte bei der Toe-In Anordnung in allen Parallaxen-Ebenen befinden. Zuletzt bietet diese Anordnung gegenüber den parallel Kameras den Vorteil, dass sehr nahe liegende Objekte besser erfasst werden können. Die Fokussierung eines solchen Objekts birgt jedoch das Risiko, dass der Konvergenzwinkel, der Winkel, der von beiden Sehachsen eingeschlossen wird, zu groß wird. Dies entspricht ei-

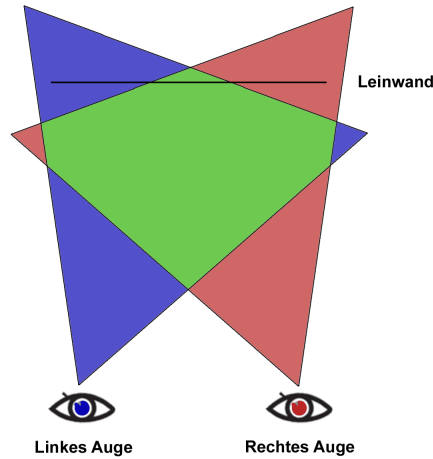


Abbildung 2: Bei der Toe-In Anordnung sind die Kameras zueinander geneigt. Auch naheliegende Objekte können im 3D-Bereich (grün) erfasst werden.

nem sehr starken Schielen, welches den stereoskopische Effekt zerstört. Ein weiterer Nachteil dieser Anordnung liegt in der Verzerrung der beiden Einzelbilder, die abhängig von den Brennweiten der eingesetzten Kameras auftritt. Bei zu starker Verzerrung ist sogar eine Nachbearbeitung der Bilder notwendig, da das Gehirn, sonst nicht in der Lage ist die korrespondierenden Punkte aus den beiden Bildern korrekt einander zuzuordnen. [Tau10, Aut08]

Parallel

Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, befinden sich beide Kameras parallel zueinander. Bei dieser Anordnung entsteht ein stereoskopischer Effekt, ohne dass Verzerrungen im Bild auftreten. Allerdings entspricht diese Anordnung mit einem Konvergenzwinkel von 0° dem Blick ins Unendliche. Dies hat den Nachteil, dass sich die Objekte optisch nur vor oder auf der Bildebene befinden können. Außerdem entsteht in jedem Bild ein großer Randstreifen, in dem Objekte nur zweidimensional dargestellt werden können. Die Informationen der in diesem Bereich liegenden Objekt fehlen im jeweils anderen Bild. Des Weiteren kann es vorkommen, dass sehr nahe liegende Objekte bei dieser Art der Anordnung nicht erfasst werden können. [Tau10, Aut08]

Frustum-Shift/ Off-Axis

Die Frustum-Shift Anordnung, auch Off-Axis oder Image-Shifted genannt, stellt eine Kombination der beiden oben erläuterten Anordnungen dar. Wie

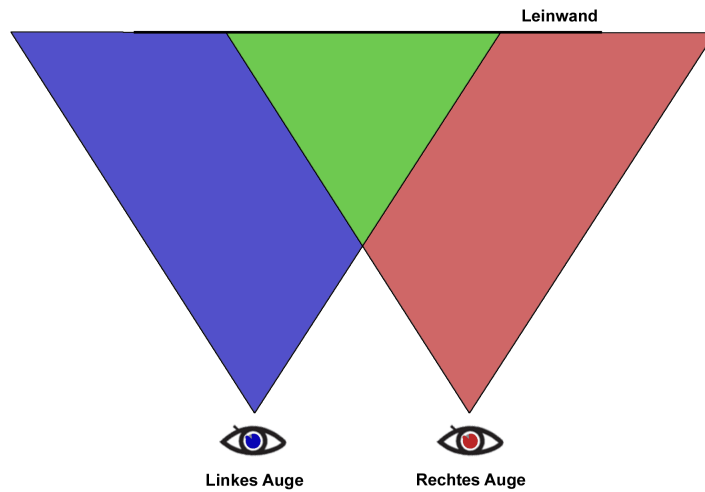


Abbildung 3: Bei dieser Anordnung sind die Sichtachsen parallel. Jede Kamera besitzt einen großen 2D-Bereich (Blau und Rot). Der Blick ins Unendliche verhindert eine positive Parallaxe im 3D-Bereich (grün).

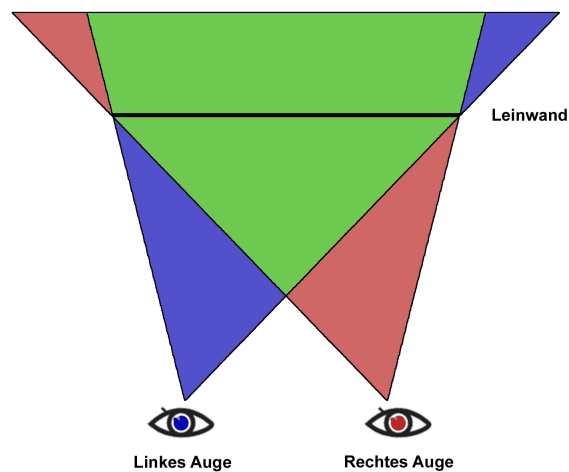


Abbildung 4: Die Frustum-Shift Anordnung verwendet zwei parallele Kameras, deren Abbildungsebenen verschoben sind. Damit ist diese Anordnung eine Kombination aus Parallel und Toe-In, die deren Vorteile übernimmt und dabei alle spezifischen Nachteile kompensiert.

bei der parallelen Anordnung sind die Kameras auch hier parallel aufgestellt, wohingegen die Abbildungsebenen ähnlich wie bei der Toe-In Anordnung übereinander liegen (Abbildung 4). Das Frustum-Shift Verfahren vereinigt damit die Vorteile der beiden oberen Anordnungen ohne deren Nachteile zu übernehmen. [Tau10, Aut08]

3.3 Stereo-Ausgabe

3.3.1 Anzeigeverfahren

Zur Betrachtung der stereoskopischen Inhalte wurden im Laufe der Zeit verschiedene Anzeigeverfahren entwickelt. Diese werden in die Bereiche aktive, passive und autostereoskopische Anzeigeverfahren unterteilt.

Aktive Anzeigeverfahren nutzen spezielle Brillen zur aktiven Aufteilung der stereoskopischen Bilder für den Betrachter. Zu dieser Art der Anzeigeverfahren gehören die Shutterbrillen-Technik und die Head Mounted Displays. Wichtig bei dieser Technik ist die Synchronität der Geräte, da es sonst zu einer falschen Zuordnung von Auge und Bild kommt.

Auch bei den passiven Anzeigeverfahren trägt der Betrachter eine Brille. Doch anders als bei den aktiven Verfahren ist nur das Ausgabegerät für die Trennung der Bilder zuständig. Durch die entsprechenden Filter in den Brillen kann jedes Auge das ihm zugewiesene Bild wahrnehmen. Zu den passiven Anzeigeverfahren gehören Anaglyphen, Chromadepth, passive Polarisation, KMQ und die Interferenzfiltertechnologie.

Die autostereoskopischen Anzeigeverfahren kommen im Gegensatz zu den aktiven und passiven Anzeigeverfahren lediglich mit einem Ausgabegerät aus. Eine Brille wird hierbei nicht benötigt.

Im Rahmen der Bachelorarbeit wurde eine Art der passiven Polarisation, die lineare Polarisationstechnik, eingesetzt. Diese Technik setzt auf Polarisationsfilter bei der Ausgabe des Bildes. Dazu wird das Bild in zwei unterschiedliche Richtungen polarisiert. Bei der Verwendung von Projektoren wird daher auch eine spezielle Leinwand benötigt. Die Filterung durch die Brille zeigt das entsprechende Bild für das jeweilige Auge.

Diese Technik besitzt jedoch einen großen Nachteil. Der Betrachter darf den Kopf nicht neigen, da sonst die Filterung durch die Brille nicht mehr korrekt funktioniert.

Die Weiterentwicklung der linearen Polarisation ist die zirkulierende Polarisation. Vor allem in Kinos konnte sich diese Technologie durchsetzen. Bei Fernsehern und Monitoren sorgt die Technik für eine Halbierung der Auflösung, da die Pixel selbst polarisiert werden müssen. Ein Vorteil gegenüber der linearen Polarisation ist, dass die Bildtrennung auch bei leichtem Neigen des Kopfes erhalten bleibt.

Vermutlich auch deshalb wird für Privatgeräte vornehmlich die Shutterbrillentechnik eingesetzt, vereinzelt findet diese Technik auch in Kinos Anwendung. Hierbei werden die Bilder für linkes und rechtes Auge hintereinander gezeigt.

Bei kleineren Geräten, wie Handys oder Handhelds, hat sich inzwischen die Autostereoskopie durchgesetzt. Die Autostereoskopischen Geräte setzen dabei auf unterschiedliche Bildschirm-Techniken, um das passende Bild für das jeweilige Auge zu projizieren. Der größte Nachteil bei dieser Technik ist derzeit, dass der stereoskopische Effekt auf einen Betrachter beschränkt ist. In den Print-Medien werden Anaglyphen eingesetzt. Die Trennung der beiden Bilder erfolgt dabei über einen Farbfilter, oftmals ein Rot-Cyan-Filter.

Da diese Techniken allerdings für die vorliegende Arbeit nicht von Relevanz sind, soll an dieser Stelle auch nicht weiter auf sie eingegangen werden.

Die verbleibenden Techniken werden eher selten kommerziell genutzt und werden an dieser Stelle nicht näher erläutert. Nähere Informationen sind unter [B197, Müa, Cla10] zu finden.

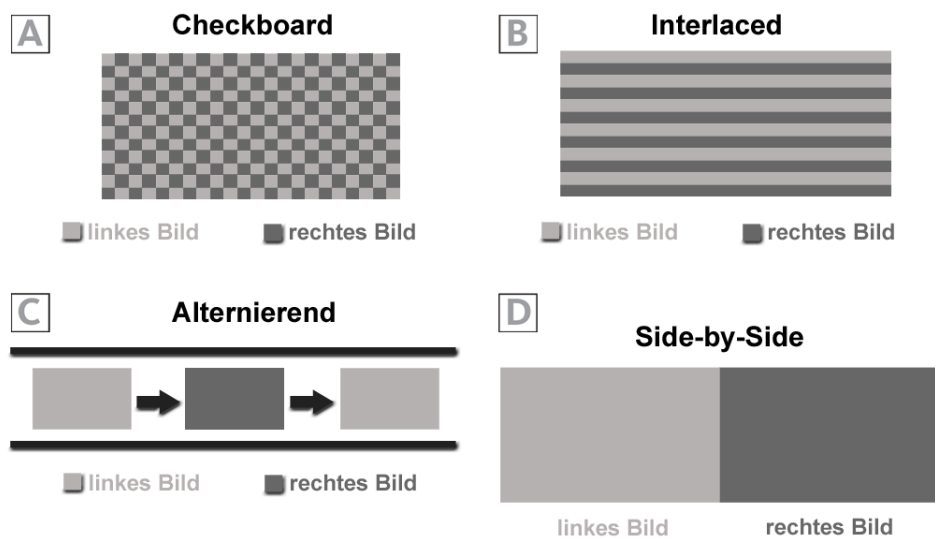


Abbildung 5: Bildformate: (A) Checkboard, (B) Interlaced - spaltenweise, (C) Alternierend, (D) Side-By-Side - nebeneinander

3.3.2 Bildformate

Neben einer breiten Vielfalt an Anzeigeverfahren haben sich auch verschiedene Bildformate etabliert (Abbildung 5). Die Wahl des Bildformats hängt dabei nicht direkt vom Anzeigeverfahren, sondern von den Dekodierungsmöglichkeiten des Ausgabegeräts ab. [Tau10]

Das erste hier vorgestellte Bildformat ist Interlaced. Das übertragene Bild

wird aus einzelnen Spalten oder Zeilen zusammengesetzt, die abwechselnd vom linken und rechten Bild stammen. [Tau10] Als Alternierend werden alle Verfahren eingeordnet, bei denen die Bilder abwechselnd für das linke und rechte Auge übertragen werden. Diese Zeitversetzung ermöglicht zwar die Übertragung in voller Auflösung, führt jedoch zu einer Halbierung der Bildrate. [Tau10]

Beim Checkboard werden die beiden Bilder schachbrettartig miteinander verschmolzen. Ähnlich funktioniert das Side-By-Side Verfahren. Hierbei werden die Bilder nebeneinander oder untereinander angeordnet. Unvermeidlich ist bei beiden Verfahren eine Verzerrung des stereoskopischen Bildes, da es in der nativen Auflösung übertragen wird. Dies wird toleriert, um Bilder über alle Geräte hinweg verlustfrei übertragen zu können. [Tau10]

In dieser Arbeit wird das Side-By-Side Verfahren eingesetzt. Die beiden verwendeten Projektoren werden zu einem virtuellen Bildschirm zusammengeführt, wodurch die unverzerrte Übertragung des Bildes ermöglicht wird.

3.3.3 Grundlegende Problematik

Nicht nur die noch folgenden Probleme in Kapitel 3.4 führen zu Schwierigkeiten bei der Erstellung von stereoskopischen Inhalten. Auch das Fehlen von einheitlichen Standards bei der Bildübertragung und Bildwiedergabe führt zu erschwerten Bedingungen. Stattdessen entwickeln die verschiedenen Hersteller und Anbieter (Film und Fernsehen) oftmals eigene Standards. [B197]

3.4 Problematiken des stereoskopischen Renderns

Die Notwendigkeit zweier Kameras zur Erzeugung stereoskopischer Inhalte birgt einige spezielle Schwierigkeiten. Diese Erschwernisse beziehen sich zum einen auf den doppelten Render-Durchlauf, zum anderen auf die korrekte Darstellung des Stereo-Bildes.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich vornehmlich mit den folgenden Problematiken.

3.4.1 Crosstalk

Beim Crosstalk, auch als Ghosting bekannt, nimmt ein Auge das Bild des anderen Auges ebenfalls wahr. Die Fehlerpalette reicht dabei von geisterhaften Silhouetten bis zur getrennten Wahrnehmung beider Bilder.

Dieses Problem ist vor allem auf die Hardware zurückzuführen. Asynchrone Übertragung bei Shutterbrillen oder das zu starke Neigen des Kopfes führen zum Crosstalk. [Aut08, Cry12]

3.4.2 Individuelle Fehler

Wie in Kapitel 3.2.3 bereits angesprochen, besitzen die Kameraeinstellungen Toe-In und Parallel verschiedene Nachteile. Ein mögliches Problem der Toe-In-Anordnung ist ein zu großer Konvergenzwinkel. Dieser Fall tritt ein, wenn die Kameras ein übermäßig nahe liegendes Objekt fokussieren. Ein Nachteil der parallelen Kameras ist die fehlende positive Parallaxe. Aufgrund dieser Tatsache gibt es keine Objekte hinter dem Bildschirm.

3.4.3 Divergente Parallaxe

Wie bereits in Kapitel 3.2.2 erwähnt, würde sich im Fall der divergenten Parallaxe der Schnittpunkt der Sehachsen und damit der fokussierte Punkt hinter den Kameras befinden. Zustände kann dieser Fehler durch eine inkorrekte Zuordnung von Bild zu Auge kommen. Während der Ausgabe werden das linke und rechte Bild miteinander vertauscht und dadurch jeweils dem falschen Auge zugeordnet. Der Fehler kann ebenfalls eintreten, wenn eine negative interaxiale Separation verwendet wird, das bedeutet, die Kameras wieder miteinander vertauscht werden. [Aut08, B197]

Auch die Änderung des Abstands zwischen Ausgabegerät und Betrachter kann zu diesem Fehler führen, da die eingestellte interaxiale Separation größer ist als die Benötigte.



Abbildung 6: Dargestellt wird ein Blick aus dem Fenster, links nur mit dem linken, rechts ausschließlich mit dem rechten Auge. Für die Augen sind jeweils verschiedene Bereiche des Raums hinter dem Fenster sichtbar.

3.4.4 Stereo Violation

Für die Erzeugung der stereoskopischen Inhalte werden zwei versetzte Kameras benötigt. Dadurch lassen sich unterschiedliche Bereiche erkennen. Zum

einen jener Bereich, der von beiden Kameras erfasst wird und damit im stereoskopischen 3D zur Verfügung steht. Zum anderen 2D-Bereiche, die jeweils nur von einer Kamera erfasst werden.

Die 2D-Bereiche, die sich hinter der Bildebene befinden, stellen für die Verarbeitung durch das Gehirn kein Problem dar. Der Eindruck entspricht der menschlichen Wahrnehmung aus einem Fenster. Blickt man abwechselnd mit nur einem Auge aus dem Fenster, werden unterschiedliche Randbereiche sichtbar. (Abbildung 6)

Problematisch werden jedoch Objekte, die in die 2D-Bereiche vor der Bildebene ragen. Optisch sollte sich das betrachtete Objekt vor dem Ausgabegerät befinden, es wird jedoch durch dessen Rand abgeschnitten. [B197, Cry12]

3.4.5 Shadowmaps

Beim Einsatz von Schatten wird in der Computergrafik oft auf die Shadowmap-Technik zurückgegriffen. Bei diesem Verfahren wird ein Tiefenbild von der Lichtquelle aus erzeugt und in einer Textur gespeichert. Der Abstand eines betrachteten Punktes zur Lichtquelle wird mit dem gespeicherten Wert an der entsprechenden Stelle in der Textur verglichen. Ist der Abstand größer als der Wert in der Textur, befindet sich der Punkt im Schatten, andernfalls wird er beleuchtet.

Um das Tiefenbild zu erhalten, wird die Kamera in die Lichtquelle versetzt. Die Orientierung des Tiefenbildes spielt bei der Verwendung von nur einer Kamera keine Rolle. Bei Stereokameras sollte jedoch die Orientierung nicht zufällig gewählt werden, da die Ränder der Schattierung von der Abtastung abhängen und eine wechselnde Orientierung den Bildeindruck verfälschen kann.

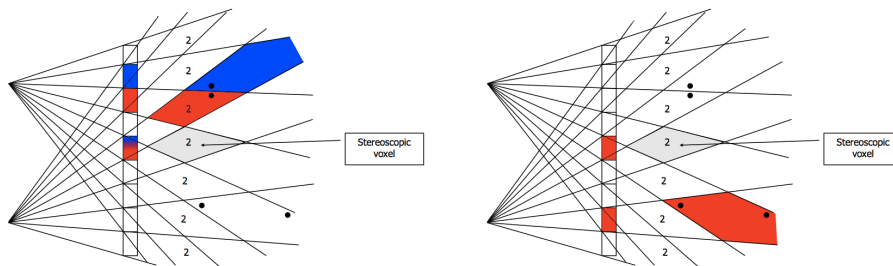


Abbildung 7: Hier werden die beiden Fehler des Depth Aliasing dargestellt. Im linken Bild erhalten zwei sehr naheliegende Punkte eine unterschiedliche Parallaxe. Dies kann zu einer unterschiedlichen Tiefenwahrnehmung beim Betrachter führen. Das rechte Bild zeigt den anderen Fall, bei dem zwei Punkte mit unterschiedlicher Tiefe im selben Stereovoxel liegen und daher dieselbe Parallaxe erhalten.

3.4.6 Depth Aliasing

Die Parallaxe ist verantwortlich für den Tiefeneindruck der stereoskopischen Inhalte. Die Pixelpaare der beiden Kameras bilden zusammen ein stereoskopisches Voxel (Volumen Element). Aufgrund der Pixelgröße deckt jedes Stereo-Voxel ein bestimmtes Volumen ab. Die Größe der Stereo-Voxel und die daraus resultierende Lage der Punkte kann jedoch das Depth Aliasing-Problem verursachen (siehe Abbildung 7).

Punkte, die sehr nahe beieinander liegen, können sich in unterschiedlichen Voxeln befinden. Dies führt dazu, dass die Punkte eine unterschiedliche Parallaxe erhalten. Dadurch entsteht der Eindruck, dass die Punkte in unterschiedlicher Tiefe liegen, ohne dass dies tatsächlich der Fall ist.

Auch der umgekehrte Fall ist möglich. Punkte mit unterschiedlicher Tiefe befinden sich in Voxeln, die die gleiche Parallaxe besitzen. Dadurch erhalten die Punkte optisch dieselbe Tiefe. Besonders mit zunehmender Entfernung werden die Stereo-Voxel immer größer und das Problem des Depth Aliasing tritt häufiger auf. [Gei06, Müb, N611]

3.4.7 Fusion Failure

Um stereoskopische Inhalte zu erzeugen, benötigen beide Kameras einen gewissen Abstand zueinander. Im Idealfall entspricht dieser Abstand dem Abstandsverhältnis der beiden Augen. Ist der Abstand jedoch deutlich zu groß gewählt, kann das Gehirn beide Bilder nicht mehr vollständig zusammenführen und der stereoskopische Effekt bleibt aus. Das Problem des zu großen Kameraabstands ist als Fusion Failure bekannt. [Gei06, N611]

3.4.8 Größenverhältnis

Stereoskopisches 3D erweckt den Eindruck, dass sich Objekte vor bzw. hinter dem Bildschirm befinden, obwohl permanent der Bildschirm fokussiert wird und nicht etwa die Position des Objekts im Raum. Dies entspricht nicht dem natürlichen Wahrnehmungsvorgang, bei dem die korrekte Fokussierung des Objekts von seiner Entfernung zum Betrachter abhängt. Dadurch zieht der Betrachter Rückschlüsse auf die Größe des Objekts. Diese Unstimmigkeit führt dazu, dass der Betrachter die Größe der Objekte beim stereoskopischen 3D nicht mehr richtig einschätzen kann. [Gei06]

4 Stereo-Programmierung

4.1 Umsetzung

Das stereoskopische Renderingsystem, das im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, teilt die verschiedenen Probleme in einzelne Szenen auf. Jede

Szene beinhaltet dabei immer einen einfarbigen Hintergrund und mindestens ein davor liegendes Objekt. Zudem besitzen alle Szenen einen Boden, abgesehen von denjenigen, die das Größenverhältnis und das Depth Aliasing-Problem testen. Hier wird der Boden aufgrund der Kameraposition nicht benötigt. Um einen höheren Kontrast zu erreichen, sind die Objekte in jeder Szene rot und der Hintergrund sowie der Boden grün eingefärbt.

Um die Wirkung der Kameraanordnung auf den stereoskopischen Eindruck zu testen, ist jede Szene mit jeder Kameraanordnung umgesetzt. In den Benutzertests wurden zunächst alle Szenen mit Toe-In Anordnung abgehandelt, danach folgten dieselben Szenen mit parallelen Kameras und letztlich wurde das Frustum-Shift Verfahren angewendet.

Für die Realisierung des Programms wurde die OpenGL und GLUT Programmierschnittstelle genutzt. Des Weiteren wurde noch GLSL in Zusammenarbeit mit GLEW verwendet. Für die Szenen wurden vorgefertigte OBJ-Modelle eingesetzt.

4.2 Implementierung

Dieses Kapitel geht auf die Funktionsweise des Programmes ein. Dazu werden die einzelnen Klassen und deren Aufgaben näher beleuchtet.

Wie bereits im vorherigen Unterkapitel erläutert, werden für die einzelnen Szenen OBJ-Modelle eingesetzt. Diese werden von dem selbsterstellten ObjLoader geladen und als Vertex Array zur Verfügung gestellt. Verwaltet werden die ObjLoader von der Klasse ObjDefine. Diese Klasse gibt an, welche Modelle vom ObjLoader geladen werden sollen. Zudem werden die geladenen Modelle hier auf eine feste Größe skaliert.

Listing 1: Methode zur Parameteränderung

```
//Stereoszene verwendet gleiche (Szenen-)Parameter
void Scene::stereoSceneSynchro(void)
{
    //Zaehler fuer Kameras
    m_cameraAssignPuffer %= 2;
    //Nach Aufruf beider Kameras wird Bewegungsvariable erhoeht
    if (m_cameraAssignPuffer == 1)
    {
        m_alpha+=0.3;
    }
    m_cameraAssignPuffer++;
}
```

Aufgerufen wird `ObjDefine` von der Klasse `Scene`. Diese Klasse ist für die Zusammenstellung der Szenen zuständig. Mit der Methode `displayScene` werden alle Modelle, die zur derzeitigen Szene gehören, in Position gebracht, bewegt und anschließend gezeichnet. Diese Methode muss dabei für beide Kameras aufgerufen werden.

Jegliche Verschiebungen und Rotationen in dieser Klasse hängen von der Variable `Alpha` ab. Durch die Methode `stereoSceneSynchro` wird sichergestellt, dass beide Kameras denselben Wert verwenden (siehe Listing 1). Die Methoden `drawBackground` und `drawGround` sind für das Zeichnen des Hintergrundes und des Bodens zuständig.

In der Größenverhältnis-Szene wird das vorhandene Modell von den Testpersonen platziert. Die Steuerung der Position und Rotation erfolgt über die Methoden `translateObjects` und `rotateObjects`. Am Ende eines Durchlaufes wird mit dem Aufruf der `resetObjectsTransform` die eingestellte Positionierung zurückgesetzt.

Das Licht wird unabhängig von der Szene in der Klasse `Light` verwaltet. Obwohl die Klasse allgemein programmiert ist und damit mehrere Lichtquellen erlaubt sind, wird im Programm nur die Lichtquelle 0 verwendet. Der Grund hierfür liegt in den verwendeten Shadern, die nur diese Lichtquelle bei der Berechnung einbeziehen. Über verschiedene Getter- und Setter-Methoden kann der Diffuse-Wert, die Position und die Richtung der Lichtquelle eingestellt werden.

Um die Beleuchtung und Schatten in den Szenen zu realisieren, werden Shader verwendet. Das Auslesen der Shader-Dateien erfolgt über die Basis-Klasse `ShaderGeneral`. Nach dem Anlegen des Shaderprogramms kann dieses über die Getter-Methode `getShaderProgram` abgerufen werden.

Als Beleuchtungsmodell wird Phong verwendet. Das Anbinden der Phong-Shader an das fertige Shaderprogramm erfolgt im Konstruktor der `ShaderPhong`-Klasse.

Beim Schatten wird auf das Konzept der `Shadowmaps` gesetzt. Die Anbindung an das Shaderprogramm erfolgt ebenfalls im Konstruktor der `Shadowmap`-Klasse. Die Ermittlung der Tiefentextur, die vom Shaderprogramm zur Erzeugung des Schattens benötigt wird, erfolgt durch die Methode `createShadowMap`.

Für die Verwaltung der Kameras ist die `Camera`-Klasse zuständig. Anhand der Kamerafunktion (linke oder rechte Kamera), der benötigten Kameraanordnung und des derzeitigen simulierten Fehlers werden die entsprechenden Einstellungen wie Viewport, Kameraposition und -ausrichtung vorgenommen.

Die `main` ist das Zentrum des Programms. Neben der Eingabeverarbeitung

erfolgt in dieser Datei die Initialisierung des Programms. Des Weiteren wird der gesamte Programmablauf in der `display`-Methode verwaltet. Die Methode `renderScene` sorgt dafür, dass die Szene für beide Kameras gezeichnet wird und das entsprechende Shaderprogramm mit allen nötigen Einstellungen aktiv ist. (Listing 2)

Listing 2: Rendern der Szene

```

void renderScene(GLint cameraIter)
{
    GLuint shaderProgrammPuffer;
    //Einstellungen fuer linkes Auge
    if (cameraIter == 0)
    {
        initLeftCamera();           // Linke Kamera
                                   initialisieren
        if (m_sceneMode == SCENE_NORMAL_FIRST
            || m_sceneMode == SCENE_SHADOWMAP)
            ... // Shadowmap- oder Phong-Shader
                fuer linke Kamera abrufen
    }
    //Einstellungen fuer rechtes Auge
    else
    {
        initRightCamera();         // Rechte
                                   Kamera initialisieren
        if (m_sceneMode == SCENE_NORMAL_FIRST
            || m_sceneMode == SCENE_SHADOWMAP)
            ... // Shadowmap- oder Phong-Shader
                fuer rechten Kamera abrufen
    }

    //Gespeichertes Shaderprogramm anwenden
    glUseProgram( shaderProgrammPuffer );
    //Einstellung der Szene (Verschieben, Rotieren
    und Zeichnen von Objekten)
    m_sceneObjects->displayScene();
    glUseProgram(0);

    if (m_sceneMode == SCENE_NORMAL_FIRST ||
        m_sceneMode == SCENE_SHADOWMAP)
        m_shadowMapRight->resetTextureMatrix();
        //Texturematrix zuruecksetzen

```

```

        glLoadIdentity ();
    }

```

Die Übergabe der benötigten Pointer wie Szene, Kameraanordnung und verwendete Kamerafunktion an die entsprechenden Klassen ermöglicht eine Fallunterscheidung, so dass alle Anforderungen an das Programm umgesetzt werden. Die Verwendung von Pointern vereinfacht dabei den Aufruf der Methoden, da die Variablenänderungen in der main nicht mehr separat an die verschiedenen Klassen übergeben werden müssen.

Ein zusätzliches Merkmal des Programms ist die Ausgabe als Anaglyph. Dieser Modus wurde als Funktionstest für die Entwicklungsphase eingebaut. Dabei ist anzumerken, dass die Szenen in diesem Modus nicht eingefärbt werden. Zudem werden bei dieser Option die beide Kamerabilder zusammen nur in die linke Fensterhälfte gerendert.

5 Evaluation und Ergebnis

5.1 Testsystem

Beim verwendeten Testsystem kommt eine Rückprojektion zum Einsatz. Die beiden Projektoren befinden sich hierbei hinter der Leinwand [Müa]. Die Leinwand ist 190 cm hoch und 235 cm breit. Die beiden Bilder werden leicht versetzt (horizontal ca. 6 cm und vertikal ca. 7 cm) auf die Leinwand projiziert. Die Testpersonen befanden sich 210 cm von der Leinwand entfernt. (Abbildung 8 A)



Abbildung 8: Versuchsaufbau mit Maßangaben zu Abständen sowie Größe der Leinwand

5.2 Testaufbau

In den folgenden Abschnitten werden der Aufbau und die Aufgabe jeder Szene beschrieben. Die Fehler werden dabei in der Reihenfolge beschrieben, in der sie auch im Programm vorkommen.

Während des Tests sollten die Probanden einen Fragebogen (siehe Anhang) ausfüllen. Hierbei sollte der 3D-Eindruck und die Auffälligkeit des Fehlers bewertet werden. Für beide Bewertungen gibt es jeweils sechs Einstufungen. Es wird eine gerade Zahl verwendet, um eine neutrale Antwort zu vermeiden. Eine hohe Bewertung zeigt einen besonders guten 3D-Eindruck, bzw. keinen oder einen sehr schwachen Fehler an.

Die Testpersonen bekamen keine Hinweise, um welchen Fehler es sich handelte oder was sich in der verschiedenen Durchläufen verändert hatte.

5.2.1 Fusion Failure

Der Fusion Failure-Fehler ist die Anfangsszene jedes Durchlaufs (Abbildung 9). In dieser Szene wird jedoch nicht der Einfluss des Fehlers oder der 3D-Eindruck bewertet. Stattdessen stellt jede Testperson einen individuellen Kameraabstand ein, um den besten 3D-Eindruck zu erhalten. Ein zu große Abstand der beiden Kameras dient dabei als Ausgangssituation. Wenn die Testpersonen zu große Schwierigkeiten beim Einstellen des Wertes hatten, konnte auf einen vordefinierten Standardwert zurückgegriffen werden. Drei Autos an Positionen mit jeweils unterschiedlichen Tiefen dienen dem Probanden in dieser Szene für die Einstellung als Orientierung. Während der Entwicklungsphase zeigte sich, dass ein Auto allein dazu nicht ausreicht. Nicht nur das Einstellen des Kameraabstands fiel schwerer. Die Einstellung konnte zudem zwar für die erste Szene den richtigen 3D-Eindruck vermitteln, aber für die nachfolgenden Szenen zu Problemen führen.

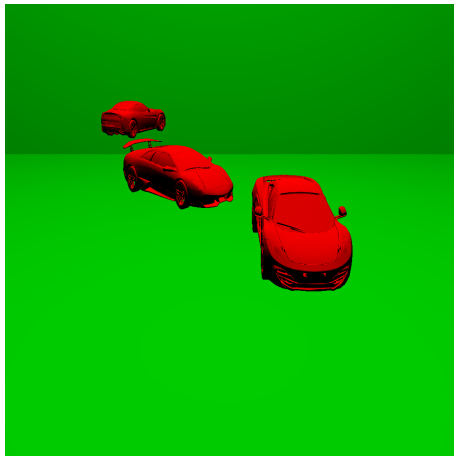


Abbildung 9: Anfangsszene - Testszene für Fusion Failure

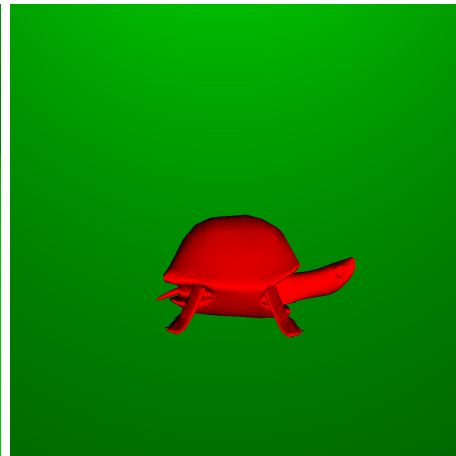


Abbildung 10: Testszene für Größenverhältnis

5.2.2 Größenverhältnis

In dieser Szene sollten die Testpersonen die Position einer Schildkröte einstellen (Abbildung 10). Die Schildkröte sollte der Länge nach einem 52,5 cm langen Stock entsprechen. Der Stock befand sich dabei 86 cm von der Leinwand und ca. 120 cm von den Testpersonen entfernt (siehe Abbildung 8 B). Die Schildkröte sollte so eingestellt werden, dass sie weder vom Stock verdeckt noch von diesem berührt wird.

Die Kamera befand sich innerhalb des Programms um den Wert 10 in Z-Richtung vom Ursprung (Weltkoordinaten) entfernt. Um die Größe der Schildkröte zu ändern, wird diese (ebenfalls in Weltkoordinaten) vom Ursprung zur Kamera bewegt. Daher ist nur der Z-Wert für das Ergebnis relevant.

Nachdem die Schildkröte eingestellt war, sollten die Probanden den 3D-Eindruck beurteilen. Eine Fehlerbewertung entfällt in dieser Szene.

5.2.3 Crosstalk

Der Crosstalk-Fehler wird in dieser Szene (Abbildung 11) mit einem simulierten Hardwarefehler untersucht. Die Ausgangssituation ist dabei eine Shutterbrille, bei der die Umschaltung zwischen den Augen nicht mehr durchgehend korrekt funktioniert. Dazu wird in dieser Szene nach einer zufälligen Anzahl an Frames statt des Bildes der rechten Kamera das Bild der linken Kamera gezeigt. Dies hat zur Folge, dass beide Augen für einen Frame nur das Bild der linken Kamera wahrnehmen.

Während der Implementierung zeigte sich, dass der Fehler bei der Bewegung von vorbeifahrenden Autos nicht wahrnehmbar war, da es keine festen Objekte zur Fixierung und Orientierung gab. Daher werden rotierende Auto in dieser Szene eingesetzt.

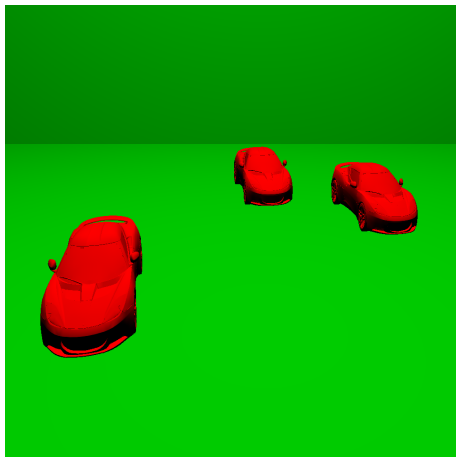


Abbildung 11: Testszene für Crosstalk

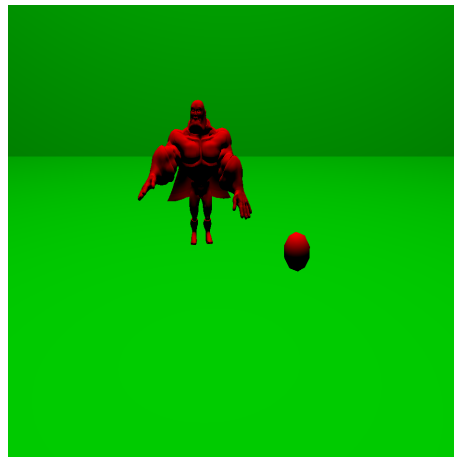


Abbildung 12: Testszene für divergente Parallaxe

5.2.4 Divergente Parallaxe

Wie bereits in Kapitel 3.4.3 erläutert, kann dieser Fehler durch das Vertauschen der beiden Kamerabilder zustande kommen. Neben dem Vertauschen der Kamerabilder wird der Abstand der beiden Kameras für diese Szene erhöht. Während der Entwicklungsphase zeigte sich, dass es dem Gehirn bei einer kleinen interaxialen Separation möglich war, den Fehler der vertauschten Bilder zu kompensieren. (Abbildung 12)

5.2.5 Großer Konvergenzwinkel

Der zu große Konvergenzwinkel gehört zu den individuellen Fehlerszenen (Abbildung 13). Wie bereits in Kapitel 3.2.2 erwähnt, handelt es sich um einen Fehler der Toe-In-Kameraanordnung. Bei der Toe-In-Anordnung werden beide Kameras auf einen gemeinsamen Punkt ausgerichtet. Damit der Konvergenzwinkel zu groß wird, wird der gemeinsam fokussierte Punkt im Programm näher an die Kameras gelegt.

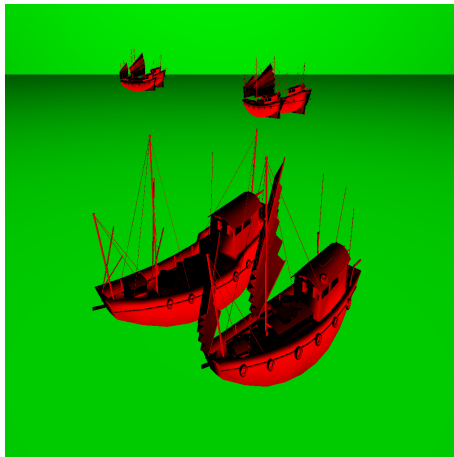


Abbildung 13: Testszene für zu großen Konvergenzwinkel bei Toe-In und fehlende positive Parallaxe bei Parallel

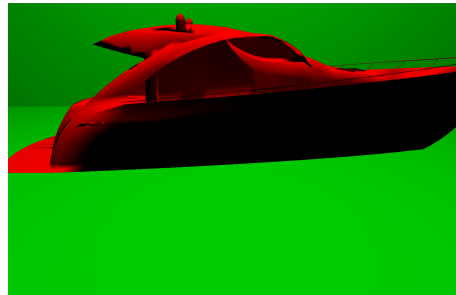


Abbildung 14: Testszene für Stereo Violation

5.2.6 Keine positive Parallaxe

Für die parallele Kameraanordnung wird das Fehlen der positiven Parallaxe in der individuellen Szene untersucht. Nicht nur fehlende Hinweise zum Fehler, sondern auch der Aufbau der Szene erschweren das Erkennen des Fehlers. Daher sollten die Testpersonen zusätzlich angeben, wo sich die Schiffe räumlich befanden, das heißt, ob sie in der Szene vor, auf oder hinter der

Projektionsfläche lagen.

Um die Problematik besser untersuchen und vergleichen zu können, wird beim Durchlauf mit der Frustum-Shift-Anordnung in dieser Szene unter denselben Bedingungen wie bei Parallel getestet.

5.2.7 Stereo Violation

In dieser Szene (Abbildung 14) ragt ein Schiff in die problematischen Randbereiche (Siehe Kapitel 3.4.4). Dabei muss die Position und damit die Berührung des Randes für alle Kameraanordnungen und deren möglichen interaxialen Separationen stimmen. Um weitere Abhängigkeiten bei der Positionierung zu vermeiden, ist die Kamera auf das 4:3-Format (Format der Leinwand/Ausgabegerät) festgelegt.

5.2.8 Shadowmaps

In dieser Szene (Abbildung 15) wird das Problem von unterschiedlichen Shadowmaps simuliert. Gerade am Rand kann es durch eine unterschiedliche Abtastung der Tiefen zu unterschiedlichen Stufeneffekten kommen. Um eine unterschiedliche Abtastung sicher zu stellen, werden verschiedene Orientierungen für die Shadowmaps verwendet. (Abbildung 15)

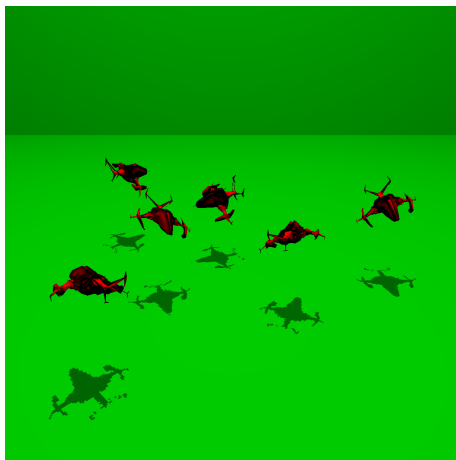


Abbildung 15: Testszene für Shadowmaps mit unterschiedlicher Orientierung

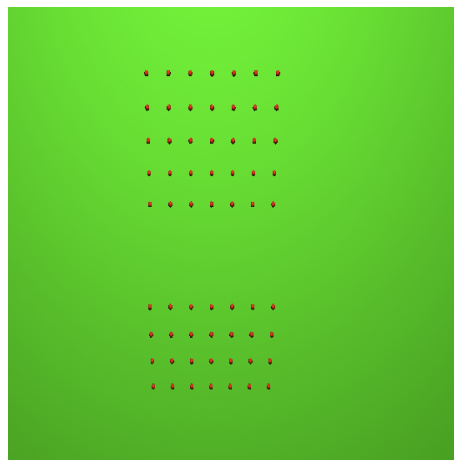


Abbildung 16: Testszene für Depth Aliasing

5.2.9 Depth Aliasing

Dieser Fehler wird nur in der Frustum-Shift-Anordnung untersucht. Die Kugeln in dieser Szene (Abbildung 16) sind in zwei Gruppen angeordnet. Um

große Stereovoxel zur Verfügung zu haben, wurden die beiden Kugelanordnungen im Raum hinter der Projektionsfläche platziert. Bei der oberen und unteren Gruppe sind die Kugeln in Reihen untereinander angeordnet. Die Reihen besitzen dabei unterschiedliche Tiefenwerte. Die Tiefenveränderung ist bei der unteren Gruppe dabei doppelt so groß wie bei der oberen Gruppe. Die Testpersonen sollten bei den beiden Gruppen angeben, ab wann sich die Reihen in einer unterschiedlichen Tiefe befinden.

Diese Testszene untersucht vor allem das Problem, dass Objekte unterschiedlicher Tiefen die selbe Parallaxe verwenden. Die Bewertung des Fehlers entfiel in dieser Szene.

5.2.10 Normale Szenen

Das Programm enthält zudem zwei Szenen ohne Fehler, die zur Kontrolle und für Vergleichsdaten vorhanden sind. Der Aufbau der Szenen orientiert sich dabei an den fehlerhaften Szenen. Die zweite fehlerlose Szene stellt Objekte in unterschiedlichen Tiefen dar und kommt nach der Stereo Violation zum Einsatz. In der ersten normalen Szene hingegen erhalten die Objekte zusätzlich einen Schatten. Im Gegensatz zur fehlerhaften Szene werden für die Schattenerzeugung Shadowmaps mit gleicher Orientierung verwendet. Diese Szene wird nach der Divergenten Parallaxe gezeigt.

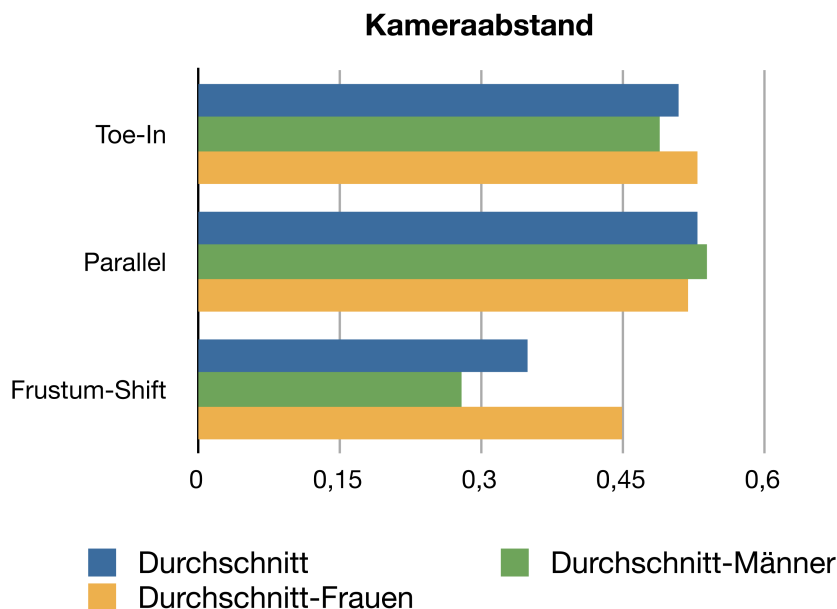


Abbildung 17: Diagramm: Kameraabstand (Tabelle siehe Anhang, Seite i)

5.3 Testergebnisse

5.3.1 Kameraabstand

Das Einstellen des Kameraabstands stellte für die Testpersonen kaum ein Problem dar. Lediglich bei 4 von 36 Einstellungen musste auf einen vordefinierten Standardwert zurückgegriffen werden. Zwei Personen brauchten dabei Hilfe beim Einstellen des Wertes für die Frustum-Shift-Anordnung. Eine weitere Person griff bei der Toe-In und bei der parallelen Anordnung auf den Standardwert zurück. Anzumerken ist hierbei, dass lediglich Männer Unterstützung beim Einstellen der Werte benötigten.

Die Testergebnisse zeigen, dass Männer und Frauen bei der Toe-In sowie der parallel Kameraanordnung im Durchschnitt sehr ähnliche Werte verwenden (siehe Abbildung 17). Bei der Toe-In Anordnung stellten Männer einen Wert von 0,49 und Frauen einen Wert von 0,53 ein. Mit 0,54 bei den Männern und 0,52 bei den Frauen wurden bei der parallelen Kameraanordnung sehr ähnliche Werte verwendet. Auch beim allgemeinen durchschnittlichen Kameraabstand gibt es mit 0,51 bei Toe-In und 0,53 bei Parallel nur eine geringe Abweichung. Lediglich die eingestellten Werte für Frustum-Shift stechen heraus. Bereits bei der Unterscheidung der Geschlechter fällt auf, dass die Durchschnittswerte mit 0,28 bei den Männern und 0,45 bei den Frauen sehr unterschiedlich sind. Auch der allgemeine Durchschnittswert weicht mit 0,35 sehr von denen der Toe-In (0,51) und parallelen (0,53) Kameraanordnung ab.

Die Einzelwerte machen deutlich, dass es große Schwankungen sowohl zwischen den verschiedenen Testpersonen, als auch zwischen den verschiedenen Kameraanordnungen gibt. Lediglich bei der Frustum-Shift Anordnung fallen die Abweichungen zwischen den Testpersonen geringer aus als bei den anderen beiden Kameraanordnungen. Eine Verbindung zwischen der verwendeten Kameraanordnung und dem dazu eingestellten Wert ist nach diesen Testergebnissen nicht erkennbar.

5.3.2 Objektverschiebung (Größenverhältnis)

Bei der Verschiebung der Schildkröte kam es ebenfalls zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen (Abbildung 18). Richtet man sich nach den Durchschnittswerten liegt die Schildkröte bei einer parallelen Anordnung mit 3,83 am nächsten an der Kamera. Mit 2,56 bei Toe-In und 2,11 bei Frustum-Shift wurde die Schildkröte hier im Durchschnitt etwa um die gleiche Distanz bewegt. Betrachtet man bei diesen beiden Anordnungen den Mittelwert speziell von Männer gegenüber dem der Frauen, zeigt sich, dass der absolute Wertunterschied mit etwa 0,3 zwischen den Geschlechtern über die Kameraanordnungen hinweg ähnlich bleibt. Während die Weite bei den Männern zwischen den beiden Anordnungen mit 2,46 (Toe-In) und 2,24 (Frustum-Shift) ähnlich ausfällt, gibt es bei den Frauen mit 2,74 bei Toe-In und 1,89

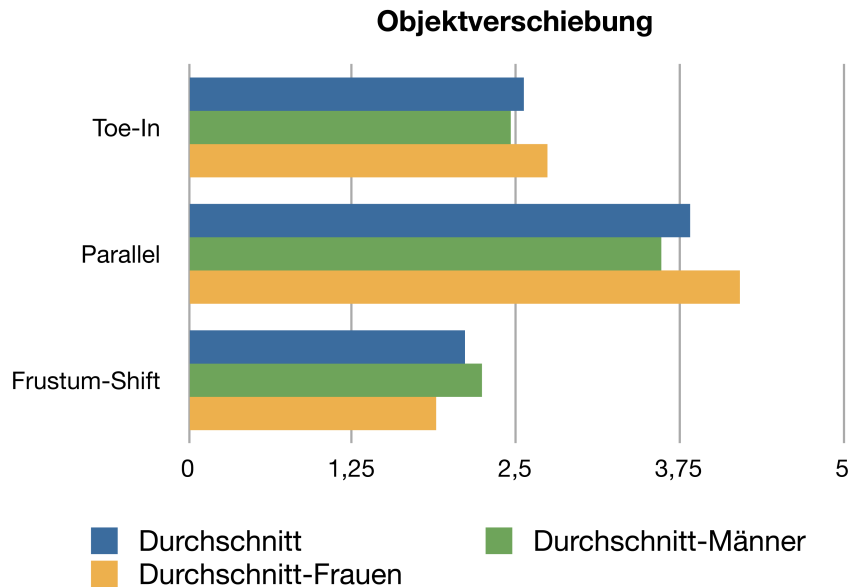


Abbildung 18: Diagramm: Objektverschiebung (Tabelle siehe Anhang, Seite i)

bei Frustum-Shift wesentliche Unterschiede.

Auch bei geschlechtsspezifischen Durchschnittsdaten zeigt sich, dass bei parallelen Kameras die Schildkröte wesentlich näher kommen musste. Die durchschnittliche Strecke liegt mit 4,21 bei den Frauen besonders hoch.

Bei der Betrachtung der Einzelwerte fällt auf, dass die Schildkröte bei parallelen Kameras in der Regel die weiteste Strecke zurücklegen musste. Die Werte 5,05 und 5,75 zeigen dabei an, dass die eingestellte Distanz zwei Mal sogar mehr als den halben Abstand von Kamera zu Ursprung beträgt. Lediglich bei zwei Testpersonen fällt die Strecke mit 1,1 und 3 kleiner aus als bei der Toe-In Anordnung mit 1,15 und 4,1. Generell wird die Verteilung der Einzelwerte jedoch gut durch deren Durchschnittswerte widerspiegelt.

Im Laufe der Tests zeichnete sich bei der Betrachtung dieser Szene ein positiver Nebeneffekt ab, denn einige Testpersonen merkten an, dass die Schildkröte sich räumlich über oder sogar vor dem Stock befinden würde.

Offen bleibt die Möglichkeit, die Objektverschiebungen mit dem eingestellten Kameraabstand in Zusammenhang zu bringen. Zwar deuten sich bereits in den vorliegenden Testergebnissen ein paar Annäherungen der Verschiebungen an, sobald ähnliche Kameraabstände bei gleicher Kameraanordnung verwendet wurden, um hier klare Schlussfolgerungen ziehen zu können, sind jedoch weitere Tests erforderlich.

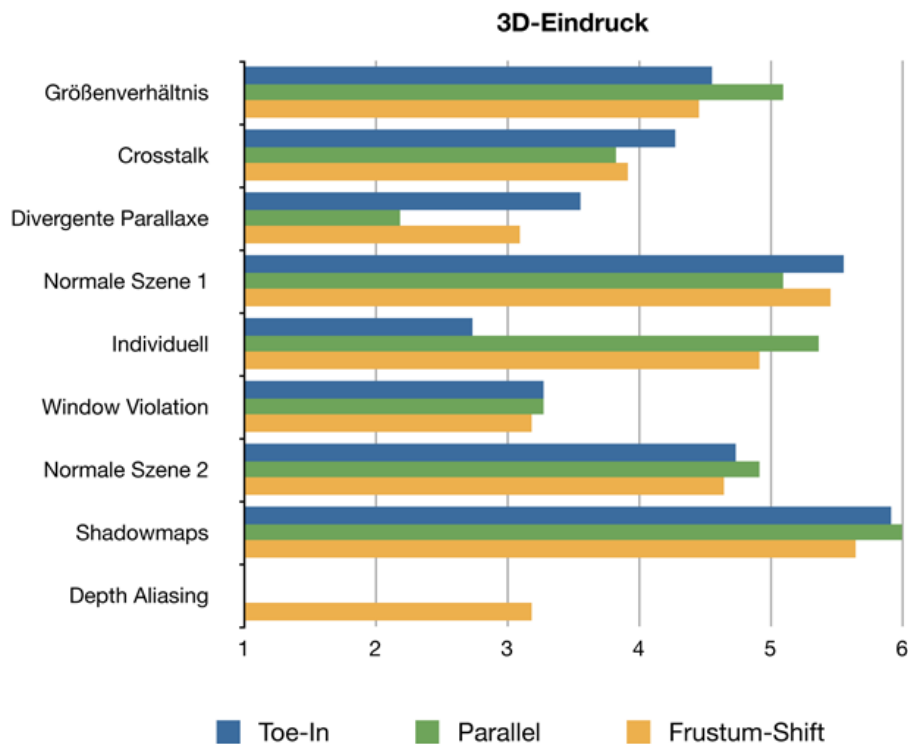


Abbildung 19: Diagramm: 3D-Eindruck (Tabelle siehe Anhang, Seite ii)

5.3.3 3D-Eindruck

Alle Kameraanordnungen erreichen in den gleichen Szenen eine ähnliche Durchschnittswertung. Abhängig von der gezeigten Szene wechseln sich dabei die Toe-In und die Parallele Kameraanordnung mit dem am besten empfundenen 3D-Eindruck ab (siehe Abbildung 19). Zwar erhält die Frustum-Shift Anordnung immer ähnliche Werte, erreicht jedoch in keiner der gezeigten Szenen einen Wert, der vor den beiden anderen Anordnungen liegt.

Interessant sind vor allem die unterschiedlichen Bewertungen des 3D-Eindrucks bei Männern und Frauen. In allen drei Durchläufen zeigt sich, dass Frauen den 3D-Eindruck stärker bewerten, als Männer. Lediglich bei zwei fehlerhaften Szenen in der Toe-In-Anordnung war der 3D-Eindruck der männlichen Probanden ausgeprägter. Auf der anderen Seite empfanden die weiblichen Testpersonen den subjektiven Eindruck in der Crosstalk- und Window Violation-Szene in allen drei Anordnungen fast doppelt so stark wie die männlichen Testpersonen.

Auffällig ist auch, die positive Resonanz der Probanden bezüglich der Szene zum Größenverhältnis. In Gesprächen während und nach den Tests haben mehrere Testpersonen große Begeisterung für die selbstständige Einstellung der Positionierung im Raum geäußert. Trotz fehlendem Schatten, der in der

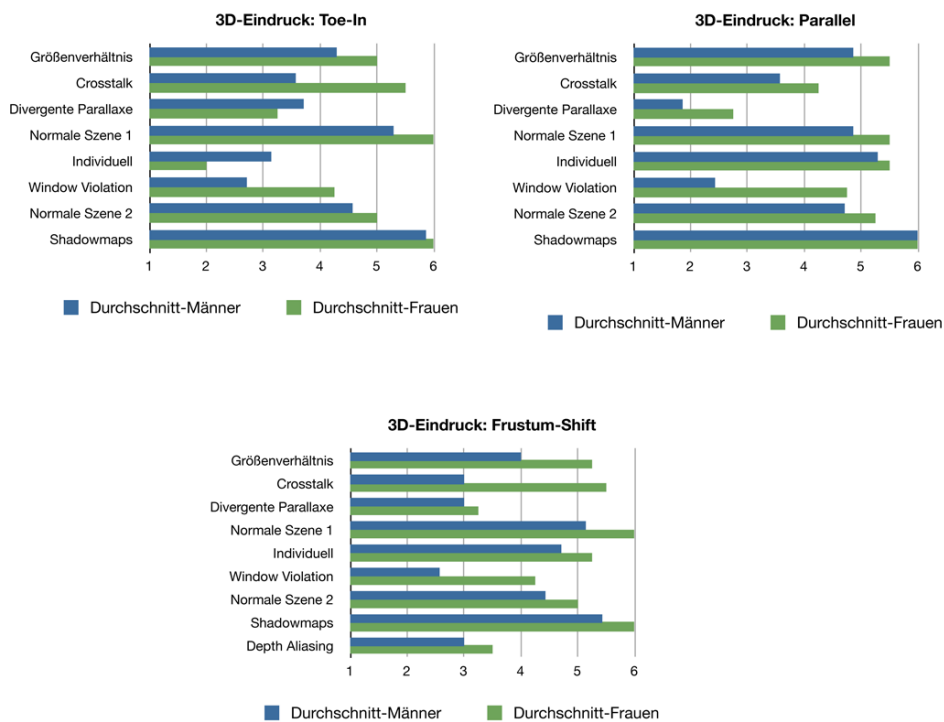


Abbildung 20: Diagramm: geschlechtsspezifischer 3D-Eindruck (Tabelle siehe Anhang, Seite iii)

Regel zur Tiefeneinschätzung herangezogen wird, fiel der Tiefeneindruck in dieser Szene bei allen Probanden gut aus.

Die Szene erreicht dabei eine Bewertung, die in etwa der zweiten fehlerlosen Szene entspricht. Die beste Bewertung erhielt die Shadowmap-Szene. Vor allem die weiblichen Testpersonen gaben der Szene in allen Durchläufen die höchste Wertung.

Die starken Abweichungen bei der individuellen Szene sind auf die beiden unterschiedlichen Fehler für die Kameraanordnungen zurückzuführen. Wie die Tests zeigen, wirkte sich die fehlende positive Parallaxe bei parallelen Kameras in der entsprechenden Szene kaum auf den 3D-Eindruck aus. Ein zu großer Konvergenzwinkel bei der Toe-In Anordnung beeinflusst den 3D-Eindruck jedoch erheblich.

5.3.4 Fehlerhafte Darstellung

Der allgemeine Durchschnitt zeigt, dass keine der bewerteten Szenen von allen Testpersonen als absolut fehlerfrei wahrgenommen wird. Bis auf den Crosstalk-Fehler, die divergente Parallaxe und dem individuellen Fehler bei der Toe-In Anordnung fielen den Testpersonen allerdings nur kleine optische Fehler auf. Eine Bewertung als fehlerfreie Szene zeigt sich erst, wenn die

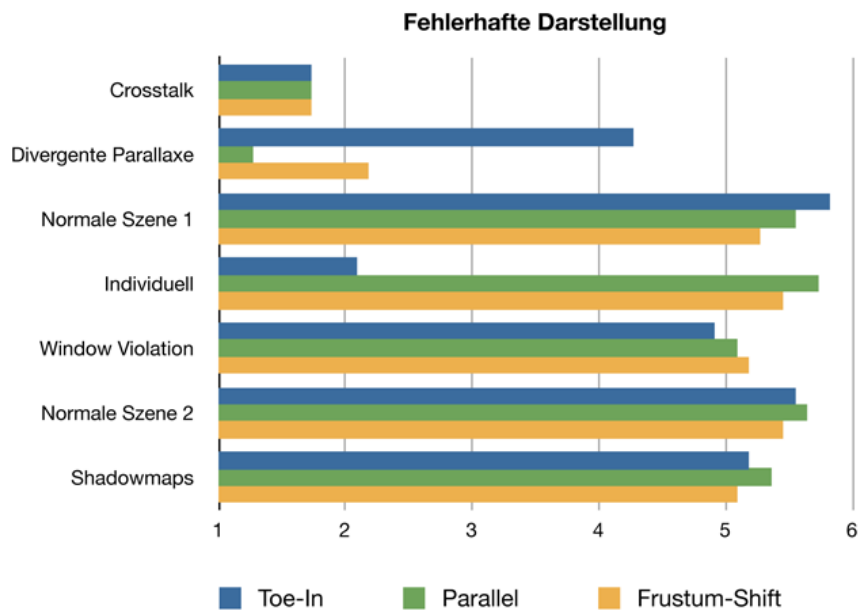


Abbildung 21: Diagramm: Fehlerhafte Darstellung (Tabelle siehe Anhang, Seite iv)

Durchschnittswerte von männlichen und weiblichen Probanden getrennt betrachtet werden. Dabei fällt auf, dass die zweite Szene am besten abschneidet (siehe Abbildung 22). Bei der Toe-In Anordnung bewerteten die weiblichen Probanden die Szene als fehlerlos, die männlichen Testpersonen gaben die gleiche Wertung bei parallelen Kameras an.

Warum die beiden normalen Szenen von den Probanden nicht als fehlerlos bewertet wurden, zeigte sich auf Nachfrage bei den Testpersonen. Es stellte sich heraus, dass die Testpersonen Fehler an den verwendeten Objekten wahrgenommen haben. Wie in Abbildung 24 zu sehen, beeinflusste bei der zweiten normalen Szene die Beleuchtung der Segel am vorderen Schiff die Fehlerbewertung. Bei der ersten normalen Szene beeinflussten die dünnen Arme des mittleren Modells das Ergebnis (siehe Abbildung 23). Die Testpersonen nahmen bei den Armen ein Flackern wahr.

Das interessanteste Ergebnis liefert die Fehlerszene zur divergenten Parallaxe. Während bei der Toe-In Anordnung zwar eine Unstimmigkeit wahrgenommen wird, fällt die Bewertung mit 4,27 dennoch relativ gut aus. Gleichzeitig erreicht diese Szene den niedrigsten Wert mit durchschnittlich 1,27 bei parallelen Kameras. Mit einem Durchschnittswert von 1 haben die weiblichen Testperson den kleinstmöglichen Wert im gesamten Test vergeben.

Die weitere Auswertung zeigt, dass die Testpersonen zwar Ungereimtheiten wahrnehmen konnten, aber die Zuordnung des Fehlers schwer fiel. In der

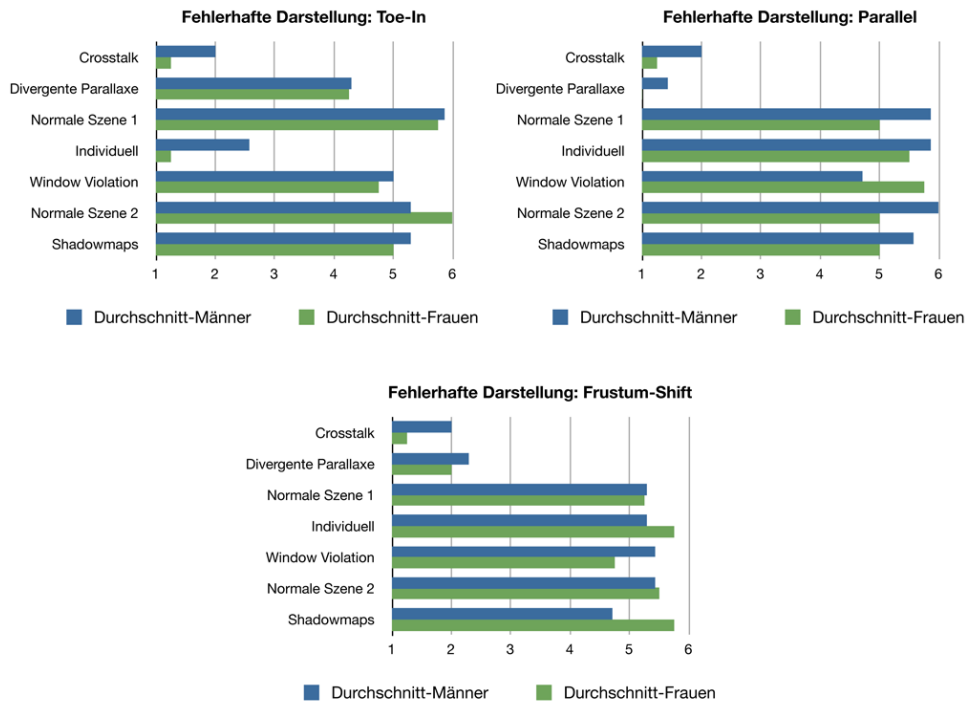


Abbildung 22: Diagramm: Fehlerhafte Darstellung - geschlechtsspezifisch (Tabelle siehe Anhang, Seite v)

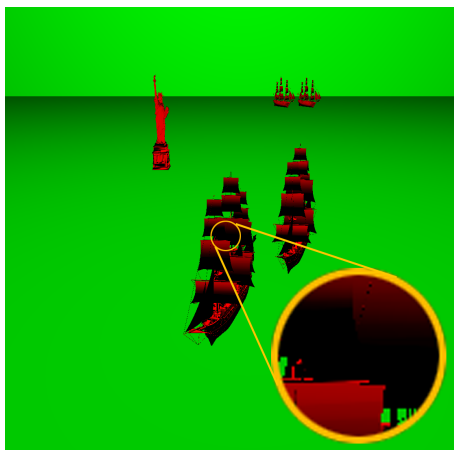


Abbildung 23: Das Problem in der zweiten normalen Szene lag in der fehlenden Kontur des vorderen Segels (gelber Kreis).

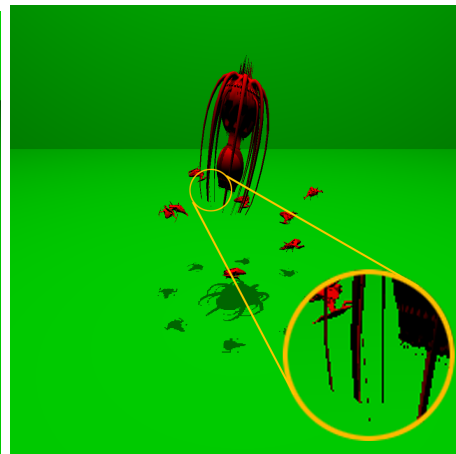


Abbildung 24: Die erste normale Szene hatte Probleme mit den Armen des mittleren Modells (gelber Kreis).

Window Violation-Szene merkten trotz der großen Leinwand die weiblichen Testpersonen den Fehler am Rand der Ausgabe an. Die Anmerkungen der männlichen Probanden in dieser Szene bezogen sich vielmehr auf das dunkle Modell. Trotz dieser unterschiedlichen Einschätzungen fällt die Fehlerbewertung ähnlich aus. Der niedrige 3D-Eindruck bei den männlichen Testpersonen ist daher vielmehr auf die Anmerkung als auf den Fehler zu beziehen. Bei dieser Szene muss zudem angemerkt werden, dass die Größe der Leinwand das Erkennen des Fehlers möglicherweise beeinflusst hat. Neben dem Window Violation-Fehler wurde auch der Shadowmap Fehler von zwei männliche Probanden erkannt.

Die Ergebnisse führen zu der Annahme, dass es kein generelles Verhältnis zwischen 3D-Eindruck und Fehlerbewertung gibt. Zwar besitzen die Szenen mit einem guten 3D-Eindruck auch eine positive Fehlerbewertung, jedoch lässt sich von einer guten Fehlerbewertung nicht auf einen guten 3D-Eindruck schließen. Stattdessen zeigt sich, dass auch bei unangenehmen Fehlern noch ein gewisser 3D-Eindruck vermittelt werden kann.

Zudem lassen die Ergebnisse darauf schließen, dass die Kameraanordnung keinen wesentlichen Einfluss auf die Wahrnehmung des Fehlers hat. Lediglich bei der divergenten Parallaxe wurde die Gesamtbewertung der Szene durch die Anordnung beeinflusst.

5.3.5 Objektlage (Keine positive Parallaxe)

Wie in Kapitel 5.2.6 bereits erläutert, sollten die Testpersonen die Lage der Schiffe im Raum für die Parallele und die Frustum-Shift Anordnung angeben. Trotz fehlender positiver Parallaxe befanden sich nach Angaben der Testpersonen durchschnittlich 1,364 Schiffe hinter der Projektionsebene. Dieser Wert kommt ausschließlich durch die männlichen Testprobanden zustande. Diese schätzten, dass im Durchschnitt 2,143 Schiffe hinter der Projektionsebene lagen. Bei den weiblichen Testpersonen befinden sich hingegen keine Schiffe hinter der Leinwand.

Im allgemeinen Durchschnitt liegen etwa 2 Schiffe auf der Leinwand, wohingegen sich die restlichen 2,636 Schiffe vor der Projektionsleinwand befinden. Auch hier zeigen sich zwischen den männlichen und weiblichen Testpersonen Unterschiede. Mit 2,714 Schiffen liegen bei den männlichen Probanden marginal mehr Schiffe vor der Leinwand als bei den weiblichen Testpersonen mit 2,5 Schiffen. Bei den weiblichen Befragten liegen die restlichen 3,5 Schiffe auf der Leinwand, während es bei den männlichen Testpersonen nur noch 1,143 Schiffe sind. (Abbildung 26)

Bei der Frustum-Shift Anordnung fällt die Bewertung anders aus. Hier liegen im allgemeinen Durchschnitt nur 1,136 Schiffe vor der Leinwand. Bei dieser Anordnung befinden sich mit 1,227 fast genauso viele Schiffe auf der Leinwand. Die restlichen 3,636 Schiffe befinden sich nach Angaben der Test-

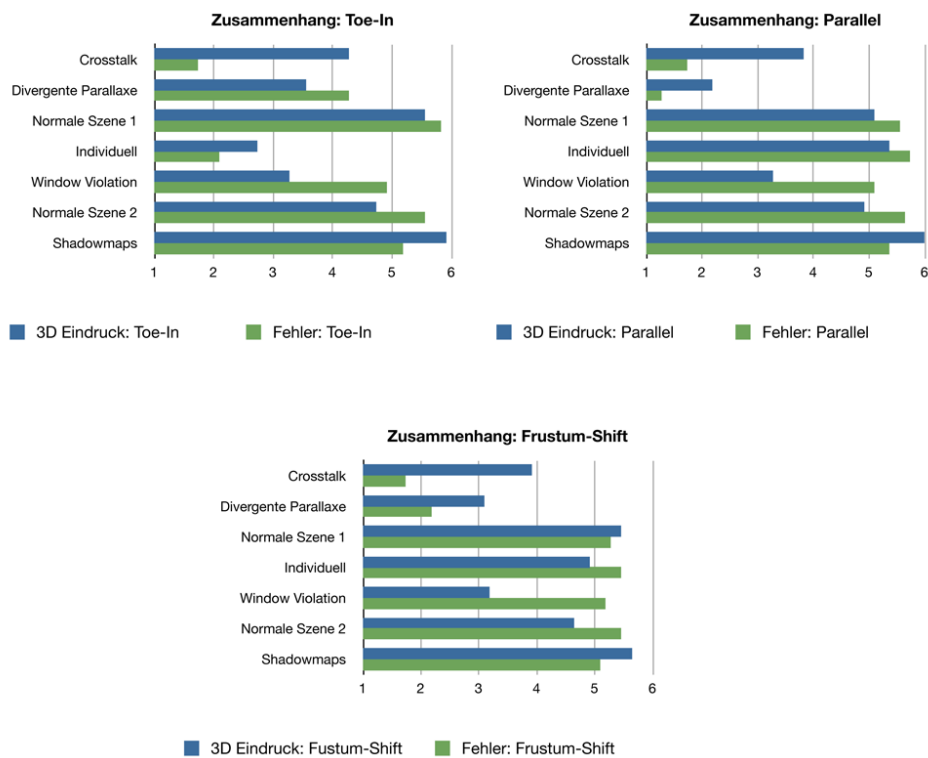


Abbildung 25: Diagramm: Zusammenhang von 3D-Eindruck und Fehler (Tabelle siehe Anhang, Seite v)

personen hinter der Leinwand. Vor allem bei den weiblichen Befragten liegen die meisten Schiffe (4,5) hinter der Projektionsleinwand. Bei den männlichen Testpersonen sind es dagegen nur 3,14. Jeweils 1,43 Schiffe liegen auf bzw. vor der Projektionsebene. Bei den weiblichen Probanden sind es 0,875 Schiffe auf der Leinwand und 0,625 vor der Leinwand.

Durch die Auswertung der Ergebnisse sind verschiedene Schlussfolgerungen möglich. Zum einen kann angenommen werden, dass durch die Änderung der Kameraanordnung das Problem der fehlenden Parallaxe vermieden wird. Dabei werden die Objekte jedoch weit in den Hintergrund versetzt. Zieht man nun die Ergebnisse aus der Objektverschiebung heran, lässt dies eine interessante Schlussfolgerung zu: Die Position der Schiffe ändert sich in der betreffenden Szene nicht, sondern lediglich die Kameraanordnung. Die Tests zur Objektverschiebung haben außerdem gezeigt, dass Objekte bei paralleler Kameraanordnung deutlich näher an die Kamera herangeholt werden müssen, um den gleichen Größeneindruck zu erzeugen wie bei Frustum-Shift-Anordnung. Für die Szene zur Objektlage folgt daraus, dass die Schiffe in der Frustum-Shift-Anordnung größer wirken müssten. Es ist denkbar, dass sich diese Veränderung des Größeneindrucks auch auf die Tiefeneinschätzung auswirkt. Diese Theorie muss jedoch durch weitere Tests überprüft werden.

Zum anderen deutet sich bei den Ergebnissen der parallele Kameraanordnung an, dass die männlichen Probanden Probleme mit der Tiefeneinschätzung haben. Bei den weiblichen Testpersonen tritt diese Fehleinschätzung nicht ein. Dies führt zur Annahme, dass Frauen den stereoskopischen Effekt und damit den Tiefeneindruck besser wahrnehmen. Auch hier sollten zur Überprüfung der These weitere Tests durchgeführt werden.

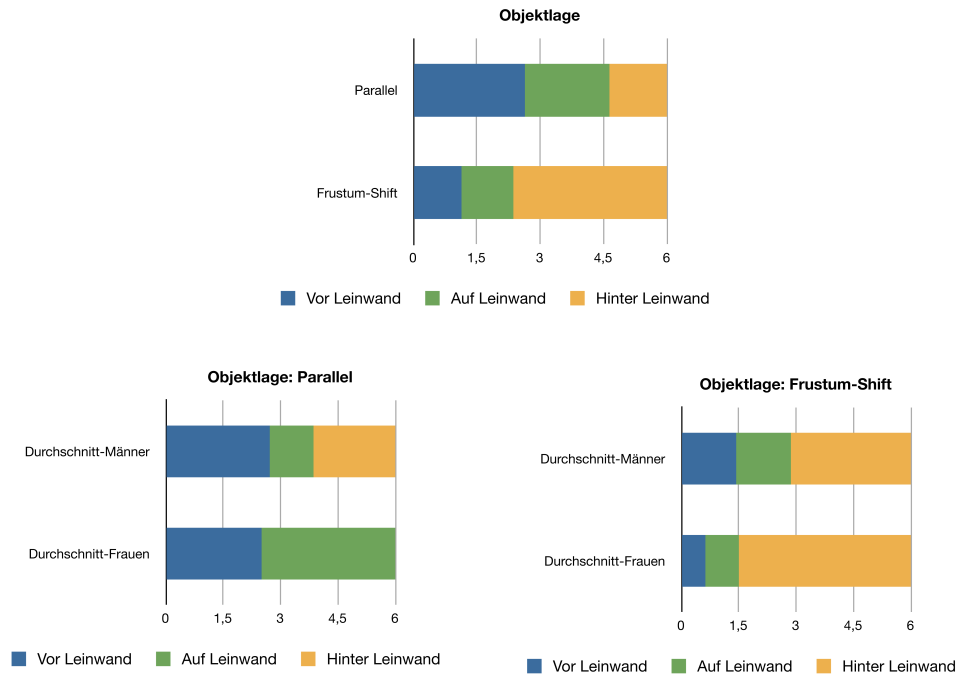


Abbildung 26: Diagramm: Objektlage (Tabelle siehe Anhang, Seite vi)

5.3.6 Objektlage (Depth Aliasing)

Die Ergebnisse der oberen Kugelgruppe in dieser Szene zeigen, dass die meisten Probanden keine unterschiedlichen Tiefen wahrnehmen konnten. Bei der unteren Gruppe stellten vier Testpersonen eine andere Tiefe ab der zweiten Reihe und eine Testperson eine andere Tiefe ab der dritten Reihe fest. Die restlichen Probanden konnten auch hier keine unterschiedlichen Tiefeneindrücke wahrnehmen.

Vergleicht man die Angaben der Testpersonen mit den individuellen Kameraabständen zeigt sich, dass nur die Probanden, die den Kameraabstand selbst eingestellt haben, eine Tiefenverschiebung bei der unteren Kugelgruppe wahrnehmen konnten. Um bereits kleine Tiefenveränderungen wahrnehmen zu können, ist entscheidend, in welchem Maße die Stereovoxel den Raum abdecken. Anhand der gegebenen Testergebnisse lässt sich folglich anneh-

men, dass eine geeignete Abdeckung für die gezeigte Szene bei einem Kameraabstand etwa im Bereich von 0,32 bis 0,44 erzielt wird.

6 Fazit und Ausblick

Die Erzeugung stereoskopischer Inhalte bringt viele Herausforderungen mit sich. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die vorgestellten Problematiken oftmals zwar nicht stark auf die Nutzer auswirken, dass aber nicht alle Fehler vernachlässigbar sind. Entsprechende Strategien zur Vermeidung sind daher unerlässlich.

[Cla10] zeigt, dass bereits die Verwendung der Frustum-Shift Anordnung die individuellen Fehler beheben kann. Eine entscheidende negative Auswirkung auf den 3D-Eindruck ist dabei nicht zu erwarten.

Weiterführend ist denkbar einen geringeren Standardabstand für die Kameras zu verwenden, um das Problem des Fusion Failure zu verhindern. Allerdings würde dies, wie bereits erwähnt, zur Hypostereoskopie und damit zur Abschwächung des 3D-Eindrucks führen. Vorangegangene Arbeiten haben bereits gezeigt, dass sich kameraunabhängige Berechnungen problemreduzierend auswirken können. [Gat] erläutert den Sachverhalt anhand der Berechnung von Shadowmaps. Werden entsprechende Generierungen und Einstellungen nicht für jede Kamera einzeln durchgeführt, lassen sich Probleme umgehen, die durch doppelte Berechnungen auftreten können. Dazu zählen beispielsweise unterschiedlich orientierte Shadowmaps. Andererseits kann durch die unnötige Wiederholung derselben Prozedur wichtige Rechenleistung eingespart werden. In Zukunft sollte dieser Vorteil näher analysiert und an geeigneten Stellen weiter angewendet werden.

Das Problem der Stereoviolation kann mithilfe einer dritten Kamera gelöst werden. Diese Kamera ermittelt, welche Objektteile für die Stereokameras sichtbar sein sollen. Eine entscheidende Rolle spielt hier die Platzierung der Kamera. Da sie sich leicht vorangestellt zwischen den beiden Stereokameras befindet, werden Objektteile im problematischen 2D-Bereich abgeschnitten, während die Objektteile im hinteren 2D-Bereich erhalten bleiben. [Gat] stellt die Eignung dieses Ansatzes heraus. Weitergehende Forschung ist in diesem Bereich vorerst nicht nötig.

Auch das Depth Aliasing-Problem wird sich automatisch lösen und zwar durch die fortwährend steigende Bildschirmauflösung [Ohl06]. Da die Pixel immer kleiner werden, kommt es zwangsläufig zur Reduktion der Größe der Stereovoxel. Dadurch wird die beschriebene Problematik in einen Bereich gelangen, in dem auch die Tiefeneinschätzung des Menschen an ihre Grenzen kommt. Jegliche negative Auswirkung des Depth Aliasing wird somit nicht weiter wahrnehmbar sein.

Ein Nachteil des stereoskopischen Renderns, der vermutlich auch in nächster Zeit bestehen bleiben wird, betrifft Erzeugung und Ausgabe der stereosko-

pischen Bilder. Beides ist nur für eine festgelegte Perspektive korrekt. Mit Head-Tracking ist zwar eine Lösungsmöglichkeit vorhanden, diese ist jedoch auf einen einzelnen Betrachter beschränkt [N1007]. Der Einsatz dieser Technik, zum Beispiel in Kinos oder für den heimischen Fernseher, ist daher ausgeschlossen. Um ein von der Perspektive unabhängiges Bild mehreren Personen korrekt zugänglich zu machen, ist die Erarbeitung neuer Ansätze nötig. Das entsprechende Potenzial bieten Hologramm-Fernseher, die aktuell allerdings noch Gegenstand der Forschung sind. Hologramm-Fernseher nutzen ein spezielles Display, das jeder Person das für sie ideale Bild anzeigt. Dies setzt die Berechnung der Bilder für jede Perspektive voraus. Für die derzeitigen stereoskopischen Inhalte könnten zukünftig Hologramm-Fernseher den besten Lösungsansatz bieten.

Auch bei der Übertragung kristallisiert sich mit HDMI 1.4a ein einheitlicher Standard heraus, der die Kommunikation zwischen den Geräten vereinfacht. Geräte mit den entsprechenden Spezifikationen könnten dann beide Einzelbilder in voller Auflösung übertragen bzw. empfangen. [Tau10]

Mit der aktuellen Entwicklung in der Technik und unter Berücksichtigung der vorgestellten Lösungsstrategien für die verschiedenen Problematiken können bereits gute Ergebnisse beim stereoskopischen Rendern erreicht werden. Für eine optimale Darstellung wird jedoch noch weitere Forschung notwendig sein.

Zumindest im Kino konnte das stereoskopische 3D nach ersten gescheiterten Versuchen in der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts [B197] einen erfolgreichen Neustart verbuchen. Aber erst die Weiterentwicklung und die Einigung auf Standards für die verwendeten Geräte wird den entscheidenden Durchbruch für deren Nutzung in Privathaushalten ermöglichen und damit das stereoskopische Rendern zum Teil des alltäglichen Lebens machen.

Literatur

- [Aut08] Autodesk. Stereoscopic filmmaking whitepaper, 2008.
- [B197] *StereoGraphics Developers Handbook - Background on Creating Images for CrystalEyes and SimulEyes.* www.cs.unc.edu/Research/stc/FAQs/Stereo/stereo-handbook.pdf, 1997.
- [Cla10] Matthias Clasen. Vereinfachung und automatisierung der erzeugung von virtuellen, stereoskopischen inhalten, 2010. Bachelorarbeit.
- [Cry12] Crytek. Stereoscopic rendering. <http://freesdk.crydev.net/display/SDKDOC2/Home>, Februar 2012. Letzter Aufruf: 27.9.2012.
- [Gat] Samuel Gateau. 3d vision technology - develop, design, play in 3d stereo. Presentation Nvidia.
- [Gei06] Mirko Geissler. Entwicklung einer 3d anwendung mit erweiterter optischer und haptischer unterstützung, 2006. Studienarbeit.
- [Müa] Stefan Müller. Ausgabegerate. Vorlesung Virtuelle Realität und Augmented Reality. Universität Koblenz.
- [Müb] Stefan Müller. (stereo-) rendering. Vorlesung Virtuelle Realität und Augmented Reality. Universität Koblenz.
- [N1007] 3d-displays sorgen für tiefe eindrücke und lebensechte bilder. <http://display-magazin.net/thema/displays/3d-displays>, April 2007. Letzter Aufruf: 27.9.2012.
- [N611] Ar/vr. <http://www.cobocards.com/pool/en/card/973752254/>, März 2011. Letzter Aufruf: 27.9.2012.
- [Ohl06] Patrick Ohler. Emotion video, 2006. Studienarbeit.
- [Pla11] Annika Placke. Grenzwertbestimmung stereoskopischer seheindrücke, 2011. Bachelorarbeit.
- [Rö09] Nils Röder. Grundlagen der stereoskopie. <https://www.fbi.h-da.de/labore/virtual-reality/basiswissen/stereoskopie.html>, Juli 2009. Letzter Aufruf: 27.9.2012.
- [Tau10] Alexander Taube. Stereoskopie für spiele-entwickler. *making Games Magazin*, 2010.

[Wol11] Don Woligroski. Nvidia 3d vision versus amd hd3d: 18 spiele im test. <http://www.tomshardware.de/tridef-stereoscopic-3d-gaming,testberichte-240890.html>, Oktober 2011. Letzter Aufruf: 27.9.2012.

II:

Auswertung: 3D-Eindruck											
	Fragebogen	G	Größenverhältnis	Crosstalk	Divergente Parallaxe	Normale Szene 1	Individuell	Window Violation	Normale Szene 2	Shadowmaps	Depth Aliasing
Toe-In	1	M	6	3	4	5	2	3	4	6	-
	2	W	4	6	4	6	1	3	3	6	-
	3	W	5	5	4	6	4	4	5	6	-
	4	M	5	4	6	6	6	2	6	6	-
	5	M	5	3	2	5	3	5	5	6	-
	6	M	2	5	4	6	1	3	4	6	-
	7	W	5	6	3	6	2	5	6	6	-
	8	M	3	5	5	6	4	1	5	6	-
	9	M	5	3	2	5	4	2	5	6	-
	10	W	6	5	2	6	1	5	6	6	-
	11	M	4	2	3	4	2	3	3	5	-
		Durchschnitt		4,55	4,27	3,55	5,55	2,73	3,27	4,73	5,91
Parallel	1	M	6	3	2	4	6	3	3	6	-
	2	W	6	5	4	6	6	5	5	6	-
	3	W	5	4	4	5	5	5	5	6	-
	4	M	5	2	1	2	2	2	5	6	-
	5	M	6	5	2	5	6	4	5	6	-
	6	M	2	5	3	6	6	2	4	6	-
	7	W	6	5	2	6	6	4	5	6	-
	8	M	6	2	1	6	5	1	5	6	-
	9	M	5	5	3	6	6	2	6	6	-
	10	W	5	3	1	5	5	5	6	6	-
	11	M	4	3	1	5	6	3	5	6	-
		Durchschnitt		5,09	3,82	2,18	5,09	5,36	3,27	4,91	6
Frustum-Shift	1	M	5	4	3	5	4	4	4	5	5
	2	W	6	6	3	6	6	5	6	6	6

Auswertung: Fehler	Fragebogen	G	Crosstalk	Divergente Parallaxe	Normale Szene 1	Individuell	Window Violation	Normale Szene 2	Shadowmaps
Toe-In	1	M	3	6	6	2	6	6	5
	2	W	1	3	6	1	5	6	2
	3	W	1	3	5	2	2	6	6
	4	M	2	3	6	6	6	5	3
	5	M	2	2	5	2	6	5	6
	6	M	1	6	6	1	3	5	5
	7	W	1	5	6	1	6	6	6
	8	M	1	6	6	2	6	6	6
	9	M	2	2	6	3	2	6	6
	10	W	2	6	6	1	6	6	6
	11	M	3	5	6	2	6	4	6
			1,73	4,27	5,82	2,09	4,91	5,55	5,18
Parallel	1	M	2	1	6	6	3	6	6
	2	W	1	1	4	4	6	3	2
	3	W	1	1	4	6	5	5	6
	4	M	1	1	6	6	5	6	6
	5	M	4	1	6	6	6	6	6
	6	M	1	2	6	6	5	6	4
	7	W	1	1	6	6	6	6	6
	8	M	1	1	5	5	6	6	6
	9	M	2	2	6	6	2	6	6
	10	W	2	1	6	6	6	6	6
	11	M	3	2	6	6	6	6	5
			1,73	1,27	5,55	5,73	5,09	5,64	5,36
Frustum-Shift	1	M	2	2	6	6	6	6	3
	2	W	1	1	5	6	4	5	5
	3	W	1	2	4	5	3	5	6

Λ

Auswertung: Fehler	Fragebogen	G	Crosstalk	Divergente Parallaxe	Normale Szene 1	Individuell	Window Violation	Normale Szene 2	Shadowmaps
4		M	3	2	6	6	6	3	2
5		M	3	4	5	3	6	6	6
6		M	1	3	2	4	6	6	5
7		W	1	2	6	6	6	6	6
8		M	1	1	6	6	6	6	5
9		M	3	2	6	6	2	6	6
10		W	2	3	6	6	6	6	6
11		M	1	2	6	6	6	5	6
			1,73	2,18	5,27	5,45	5,18	5,45	5,09
Toe-In	Durchschnitt	M	2	4,29	5,86	2,57	5	5,29	5,29
	Durchschnitt	W	1,25	4,25	5,75	1,25	4,75	6	5
Parallel	Durchschnitt	M	2	1,43	5,86	5,86	4,71	6	5,57
	Durchschnitt	W	1,25	1	5	5,5	5,75	5	5
Frustum-Shift	Durchschnitt	M	2	2,29	5,29	5,29	5,43	5,43	4,71
	Durchschnitt	W	1,25	2	5,25	5,75	4,75	5,5	5,75

Zusammenhang: 3D Eindruck - Fehler	Crosstalk	Divergente Parallaxe	Normale Szene 1	Individuell	Window Violation	Normale Szene 2	Shadowmaps
3D Eindruck: Toe-In	4,27	3,55	5,55	2,73	3,27	4,73	5,91
Fehler: Toe-In	1,73	4,27	5,82	2,09	4,91	5,55	5,18
3D Eindruck: Parallel	3,82	2,18	5,09	5,36	3,27	4,91	6
Fehler: Parallel	1,73	1,27	5,55	5,73	5,09	5,64	5,36
3D Eindruck: Fustum-Shift	3,91	3,09	5,45	4,91	3,18	4,64	5,64
Fehler: Frustum-Shift	1,73	2,18	5,27	5,45	5,18	5,45	5,09
Verhältnis Toe-In	2,47	0,83	0,95	1,31	0,67	0,85	1,14
Verhältnis Parallel	2,21	1,72	0,92	0,94	0,64	0,87	1,12
Verhältnis Frustum-Shift	2,26	1,42	1,03	0,9	0,61	0,85	1,11

Auswertung: Objektlage-3D					
	Fragebogen	G	Vor Leinwand	Auf Leinwand	Hinter Leinwand
Parallel	1	M	4	2	0
	2	W	2	4	0
	3	W	4	2	0
	4	M	3	2	1
	5	M	4	2	0
	6	M	2	2	2
	7	W	2	4	0
	8	M	2	0	4
	9	M	2	0	4
	10	W	2	4	0
	11	M	2	0	4
	Durchschnitt		2,636	2	1,364
Frustum-Shift	1	M	2	2	2
	2	W	0	2	4
	3	W	2	0	4
	4	M	3	2	1
	5	M	3	3	0
	6	M	0	2	4
	7	W	0,5	0,5	5
	8	M	0	0	6
	9	M	2	0	4
	10	W	0	1	5
	11	M	0	1	5
	Durchschnitt		1,136	1,227	3,636
Parallel	Durchschnitt	M	2,714	1,143	2,143
	Durchschnitt	W	2,5	3,5	0
Frustum-Shift	Durchschnitt	M	1,43	1,43	3,14
	Durchschnitt	W	0,625	0,875	4,5

Auswertung: Reihenverschiebung				Kameraanordnung
Fragebogen	G	Gruppe Oben	Gruppen Unten	Frustum-Shift
1	M	0	0	0,46
2	W	2	2	0,32
3	W	0	3	0,42
4	M	1	0	0,38*
5	M	0	0	0,38*
6	M	0	2	0,44
7	W	0	0	0,72
8	M	0	2	0,32
9	M	0	0	-0,02
10	W	0	2	0,34
11	M	0	0	0,18
	*Default-Wert verwendet		*0 = keine Reihenverschiebung	

Muster-Fragebogen	Geschlecht:	Test-Nr.:	Testreihe: / 3
--------------------------	-------------	-----------	----------------

Szene 1: (Fusion Failure / Startszene)

Kameraabstand	
Notizen	

Szene 2: (Größenverhältnis)

3D-Eindruck	schwach								stark
Objektverschiebung									
Notizen									

Szene 3: (Crosstalk)

3D-Eindruck	schwach								stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm								nicht wahr- nehmbar
Notizen									

Szene 4: (Divergente Parallaxe)

3D-Eindruck	schwach								stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm								nicht wahr- nehmbar
Notizen									

Szene 5: (Normale Szene)

3D-Eindruck	schwach								stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm								nicht wahr- nehmbar
Notizen									

Szene 6: (Individuelle Fehler)

3D-Eindruck	schwach								stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm								nicht wahr- nehmbar
Notiz:									

Muster-Fragebogen	Geschlecht:	Test-Nr.:	Testreihe: / 3
--------------------------	-------------	-----------	----------------

Szene 7: (Stereo Violation)

3D-Eindruck	schwach							stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm							nicht wahr- nehmbar

Notizen	
----------------	--

Szene 8: (Normale Szene)

3D-Eindruck	schwach							stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm							nicht wahr- nehmbar

Notizen	
----------------	--

Szene 9: (Shadowmap)

3D-Eindruck	schwach							stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm							nicht wahr- nehmbar

Notizen	
----------------	--

Weitere Notizen	
------------------------	--

Muster-Fragebogen	Geschlecht:	Test-Nr.:	Testreihe: / 3
--------------------------	-------------	-----------	----------------

Szene 1: (Fusion Failure / Startszene)

Kameraabstand	
Notizen	

Szene 2: (Größenverhältnis)

3D-Eindruck	schwach								stark
Objektverschiebung									
Notizen									

Szene 3: (Crosstalk)

3D-Eindruck	schwach								stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm								nicht wahr- nehmbar
Notizen									

Szene 4: (Divergente Parallaxe)

3D-Eindruck	schwach								stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm								nicht wahr- nehmbar
Notizen									

Szene 5: (Normale Szene)

3D-Eindruck	schwach								stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm								nicht wahr- nehmbar
Notizen									

Szene 6: (Individuelle Fehler)

3D-Eindruck	schwach								stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm								nicht wahr- nehmbar
Objekte vor Leinwand									
Objekte hinter Leinwand									
Notiz:									

Muster-Fragebogen	Geschlecht:	Test-Nr.:	Testreihe: / 3
--------------------------	-------------	-----------	----------------

Szene 7: (Stereo Violation)

3D-Eindruck	schwach							stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm							nicht wahr- nehmbar
Notizen								

Szene 8: (Normale Szene)

3D-Eindruck	schwach							stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm							nicht wahr- nehmbar
Notizen								

Szene 9: (Shadowmap)

3D-Eindruck	schwach							stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm							nicht wahr- nehmbar
Notizen								

Weitere Notizen								
------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--

Muster-Fragebogen	Geschlecht:	Test-Nr.:	Testreihe: / 3
--------------------------	-------------	-----------	----------------

Szene 1: (Fusion Failure / Startszene)

Kameraabstand	
Notizen	

Szene 2: (Größenverhältnis)

3D-Eindruck	schwach								stark
Objektverschiebung									
Notizen									

Szene 3: (Crosstalk)

3D-Eindruck	schwach								stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm								nicht wahr- nehmbar
Notizen									

Szene 4: (Divergente Parallaxe)

3D-Eindruck	schwach								stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm								nicht wahr- nehmbar
Notizen									

Szene 5: (Normale Szene)

3D-Eindruck	schwach								stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm								nicht wahr- nehmbar
Notizen									

Szene 6: (Individuelle Fehler)

3D-Eindruck	schwach								stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm								nicht wahr- nehmbar
Objekte vor Leinwand									
Objekte hinter Leinwand									
Objekte auf Leinwand									

Muster-Fragebogen	Geschlecht:	Test-Nr.:	Testreihe: / 3
--------------------------	-------------	-----------	----------------

Szene 7: (Stereo Violation)

3D-Eindruck	schwach							stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm							nicht wahr- nehmbar

Notizen	
----------------	--

Szene 8: (Normale Szene)

3D-Eindruck	schwach							stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm							nicht wahr- nehmbar

Notizen	
----------------	--

Szene 9: (Shadowmap)

3D-Eindruck	schwach							stark
Fehlerhafte Darstellung	unan- genehm							nicht wahr- nehmbar

Notizen	
----------------	--

Szene 10: (Depth Cues)

3D-Eindruck	schwach							stark
--------------------	---------	--	--	--	--	--	--	-------

Verschiebung ab Reihe* (oben)	
--------------------------------------	--

Verschiebung ab Reihe* (unten)	
---------------------------------------	--

Notizen	
----------------	--

*von unten nach oben betrachtet

Weitere Notizen	
------------------------	--