

Visualisierungsinstitut der Universität Stuttgart  
Universität Stuttgart  
Universitätsstraße 38  
D-70569 Stuttgart

Studienarbeit Nr. 2368

# **Visualisierungstechniken für Multiskopische Linsenrasterdisplays**

David Richard Schäfer

**Studiengang:** Informatik  
**Prüfer:** Jun.-Prof. Dr. Martin Fuchs  
**Betreuer:** Dipl.-Inf. Markus Kächele

**begonnen am:** 09. April 2012  
**beendet am:** 04. Oktober 2012

**CR-Klassifikation:** H.1.2



## Kurzfassung

Dreidimensionale Inhalte und Datensätze werden üblicherweise auf 2D-Ausgabegeräten betrachtet. Durch die Reduzierung auf zwei Dimensionen gehen Informationen verloren.

Es ist zwar möglich Systeme bereitzustellen, die auf Benutzerinteraktion reagieren, so dass der Inhalt aus unterschiedlichen Ansichten betrachtet werden kann und der Nutzer einen besseren Eindruck der Szene erhält, aber die einzelnen Bilder sind wieder nur 2D-Bilder und der Benutzer muss gewillt und befähigt sein, die richtigen Ansichten zu finden, um einen guten Eindruck von der Szene zu bekommen.

Diese Arbeit beschäftigt sich damit, 3D-Inhalte auf multiskopischen Displays auszugeben und zu überprüfen, ob der damit gewonnene Eindruck der Szene, durch einfaches Betrachten, verbessert werden kann. Dazu werden von einem Datensatz ein 2D-Bild, ein Farbanaglyphenbild und ein Linsenrasterdisplay angefertigt. In einer Pilotstudie wird untersucht, auf welchem Bild der Datensatz am besten vermittelt wird. Die Ergebnisse zeigen, dass ein dreidimensionaler Eindruck der Szene, der mit Hilfe des Linsenrasterdisplays oder des Farbanaglyphenbildes erzeugt werden kann, ein besseres Verständnis für den Datensatz mit sich bringt.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Verwandte Arbeiten</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Physikalische Grundlagen der Optik</b>	<b>13</b>
3.1	Strahlenoptik . . . . .	13
3.1.1	Reflexion . . . . .	14
3.1.2	Brechung . . . . .	15
3.1.3	Absorption . . . . .	16
3.2	Dünne Linsen . . . . .	16
3.3	Lichtfelder . . . . .	18
<b>4</b>	<b>3D-Darstellungstechniken</b>	<b>21</b>
4.1	Head-Mounted-Display (HMD) . . . . .	21
4.2	Brillen-Techniken . . . . .	21
4.2.1	Farbanaglyphenprojektion . . . . .	21
4.2.2	Polarisationsfiltertechnik . . . . .	22
4.2.3	Shuttertechnik . . . . .	23
4.3	Brillenlose Techniken . . . . .	23
4.3.1	Holografie . . . . .	23
4.3.2	Parallaxbarrierentechnik . . . . .	23
4.3.3	Linsenrasterdisplays . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Erzeugung von Bildern für Linsenrasterdisplays</b>	<b>29</b>
5.1	Kalibrierung und Raytracing . . . . .	29
5.2	Bei dieser Arbeit verwendetes Linsenrasterdisplay . . . . .	36
5.3	Herkunft des Datensatzes . . . . .	37
5.4	Ermittlung des optimalen Tiefenbereichs . . . . .	37
5.4.1	Allgemein . . . . .	37
5.4.2	Speziell bei dieser Arbeit . . . . .	38
5.5	Verwischung mittels Tiefenkarte . . . . .	40
5.6	Vorgehensweise bei dieser Arbeit . . . . .	44
<b>6</b>	<b>Evaluation der Linsenrasterbilder</b>	<b>45</b>
6.1	Hypothese und Durchführung . . . . .	45
6.2	Ergebnisse . . . . .	46
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>51</b>



# Abbildungsverzeichnis

---

3.1	Das Reflektionsgesetz . . . . .	14
3.2	Das Brechungsgesetz . . . . .	15
3.3	Funktionsweise einer Linse . . . . .	16
3.4	Brennpunkt einer Linse . . . . .	17
3.5	Zerstreuungskreis . . . . .	17
3.6	Light Slab Representation . . . . .	18
3.7	Lichtfeld Repräsentation mit einer Ebene und Polarkoordinaten . . . . .	19
4.1	Parallaxbarrierentechnik . . . . .	24
4.2	Linsenformen . . . . .	25
4.3	Parametrisierung eines Lichtstrahls . . . . .	25
4.4	Funktionsweise eines Linsenrasterdisplays . . . . .	26
4.5	Sichtfeld eines Linsenrasterdisplays . . . . .	26
4.6	Aliasing durch große Szenentiefe . . . . .	27
4.7	Antialiasing durch Skalieren der Szene . . . . .	28
4.8	Antialiasing durch Oversampling . . . . .	28
5.1	Muster für die Kalibrierung . . . . .	30
5.2	Zusammenhang von Sichtfeld und Brennweite . . . . .	32
5.3	Pixelpositionen hinter einer Linse . . . . .	33
5.4	Positionsberechnung der Kamera . . . . .	33
5.5	Strahlengang eines Linsenrasterdisplays . . . . .	35
5.6	Kombination von mehreren Ansichten . . . . .	36
5.7	Ausschnitt aus Bild mit mehreren, kombinierten Ansichten . . . . .	37
5.8	Testmuster zur Kalibrierung der Tiefe . . . . .	38
5.9	Foto des Linsenrasters mit dem Testmuster zur Kalibrierung der Tiefe . . . . .	39
5.10	Bild des Datensatzes . . . . .	40
5.11	Tiefentextur zur genauen Ermittlung des aliasingfreien Tiefenbereichs . . . . .	41
5.12	Nachahmung von natürlicher Schärfentiefe durch eine Tiefenkarte . . . . .	42
5.13	Fotos von fertigen Linsenrasterdisplays . . . . .	43
6.1	Bilder für die Studie . . . . .	45
6.2	Linien die verfolgt werden sollen . . . . .	46
6.3	Prozentsätze der richtig/falsch verfolgten Linien . . . . .	48
6.4	Durchschnittlich benötigte Zeiten bei der Linienverfolgung . . . . .	49

# Tabellenverzeichnis

---

5.1	Anordnung der Farben $c_1, c_2, c_3$ für das Kalibrierungsmuster . . . . .	30
6.1	Messergebnisse der Studie . . . . .	47



# 1 Einleitung

3D-Inhalte und Ausgabegeräte erfreuen sich immer größerer Beliebtheit. Während 3D-Darstellung bereits in den 1950er-Jahren eine Zeit lang in den Kinos verwendet wurde [Cem], war die dort genutzte Technik eine andere als die (siehe Kapitel 4), welche heute in immer mehr Bereichen Anwendung findet. Auf der Kinoleinwand und auf dem Fernseher, mit der jeweiligen benötigten Ausstattung, lassen sich problemlos 3D-Inhalte darstellen. Auch auf tragbaren Spielekonsolen ist die Technik bereits realisiert. 3D-Kameras und -Camcorder sind ebenso im Handel erhältlich. Abseits des Massenmarktes erhält die Technik Einzug in Bereiche wie der Medizin [Rei] oder der Archäologie [Zau].

Diese Arbeit beschäftigt sich damit die 3D-Technik zur Darstellung von Datensätzen zu nutzen. Dadurch soll es dem Betrachter möglich sein die Szene leichter zu erfassen als bei einem zweidimensionalen Bild. Das könnte auch ein System, bei dem durch Benutzereingaben die Ansicht geändert werden kann, jedoch muss der Benutzer dabei die richtigen Ansichten selbständig finden um einen guten Eindruck der Szene zu bekommen. Ein multiskopisches Display benötigt keine Eingaben und kann einen dreidimensionalen Eindruck der Szene vermitteln. Dazu müssen die Datensätze in benötigter Form aufbereitet werden und können dann auf einem multiskopischen Display ausgegeben werden. In einer Pilotstudie wird ermittelt, ob die Wiedergabe auf einem Linsenrasterdisplay Vorteile gegenüber 2D-Bildern und klassischen 3D-Darstellungstechniken, wie z. B. der Farbanaglyphenprojektion hat.

## Gliederung

Die Arbeit ist in folgender Weise gegliedert:

**Kapitel 2 – Verwandte Arbeiten:** Diskussion von Arbeiten, die mit dieser in Verbindung stehen.

**Kapitel 3 – Physikalische Grundlagen der Optik:** Ausführungen über die physikalischen Grundlagen, auf welchen diese Arbeit beruht. Dabei ist die Strahlenoptik der wichtigste Grundstein. Durch sie wird es möglich die Theorie der Linsen und der Lichtfelder zu erfassen.

**Kapitel 4 – 3D-Darstellungstechniken:** Aufzählung verschiedener Techniken, mit denen Inhalte dreidimensional präsentiert werden können. Dazu zählen auch die Linsenrasterdisplays, die in dieser Arbeit verwendet werden.

**Kapitel 5 – Erzeugung von Bildern für Linsenrasterdisplays:** Erläutert die Technik, wie die Linsenrasterdisplays kalibriert werden müssen und wie sie mittels Raytracing erstellt werden können. Die Techniken, die eingesetzt werden müssen, damit ein Linsenrasterdisplay möglichst aliasingfrei und realistisch wirkt, sind ebenfalls Teil dieses Kapitels.

**Kapitel 6 – Evaluation der Linsenrasterbilder:** Eine Evaluation der erstellten Linsenrasterdisplays, mit Hilfe derer herausgefunden werden soll, ob die Linsenrasterdisplays gegenüber 2D-Bildern und klassischen 3D-Darstellungstechniken Vorteile bieten.

**Kapitel 7 – Zusammenfassung und Ausblick:** Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit und Aufzeigen von Aspekten, die in Zukunft weiter erforscht werden können.

## 2 Verwandte Arbeiten

Die Arbeiten über Lichtfelder [LH96] bzw. Lumigraphen [GGSC96] beschreiben Methoden eine Szene aufzunehmen, so dass neue Bilder zwischen den eigentlichen Aufnahmepositionen erzeugt werden können. Dies wird möglich, wenn man die einzelnen Bilder zusammen genommen als 4D-Funktionen auffasst [LH96]. Diese Funktion wird als Lichtfeld oder Lumigraph bezeichnet (siehe Kapitel 3.3).

Gabriel Lippmann hat bereits 1908 die Grundlage für die Erstellung von Linsenrasterdisplays gelegt [Lip08b] [Lip08a]. Die Theorie dieser Technik, die als Integrale Photographie bezeichnet wird, beschreibt, dass es durch ein Linsenraster vor einer Fotoplatte möglich ist, ein Lichtfeld so aufzuzeichnen, dass mit Hilfe des selben Linsenrasters und der Fotoplatte, das Lichtfeld wieder ausgegeben werden kann. Das wird möglich, da jede Linse ein Bild aus einer leicht anderen Position, als ihre Nachbarlinsen aufzeichnet.

Diese Grundlagen ermöglichen die Erstellung von Linsenrasterdisplays, wobei die, die in dieser Arbeit verwendet werden, mit Linsen in Form eines halben Zylinders ausgestattet sind. Die Bilder, die auf das Linsenrasterdisplay aufgedruckt werden, entstehen im Computer aus Datensätzen mittels eines Raytracers. Die Bilder bestehen also nicht aus analogen (wie bei Gabriel Lippmann), sondern diskreten, digitalen Daten. Die Auflösung wird hier durch die Auflösung des Linsenrasterdisplay bzw. dessen Drucker beschränkt.

Linsenrasterdisplays bringen einige Probleme mit sich, die bei der Erstellung der Bilder beachtet werden müssen. Durch die beschränkte Auflösung, können pro Linse nur eine festgelegte Anzahl von Ansichten angezeigt werden. Daher kann es, durch Sprünge beim Übergang zwischen den Ansichten, zu Aliasing kommen, dass besonders durch kleine Details in großer Tiefe in der wiedergegebenen Szene entsteht.

Mit dem Thema Anti-Aliasing für solche Systeme beschäftigen sich einige Arbeiten. Zwicker et al. [ZMD<sup>+</sup>06] haben eine Methode entwickelt, die zuerst die Schärfentiefe des Bildschirms ermittelt und dadurch errechnet, wie der Inhalt durch Resampling optimal an die Schärfentiefe des Bildschirms angepasst werden kann. Da diese Arbeit ergründen soll, ob autostereoskopische Linsenrasterdisplays grundsätzlich einen Vorteil gegenüber 2D-Bildern bringt, wird, um nicht einen weiteren Faktor ins Spiel zu bringen, diese Technik nicht weiter betrachtet. Sie könnte aber in Zukunft ebenfalls untersucht werden.

Die Arbeit von Moller et al. [MT05] beschäftigt sich mit der Verringerung von Aliasing, indem ein Unschärfe-Filterkern mit fester Breite zum Einsatz kommt, der durch Verwischen den Sprung zwischen zwei Ansichten weicher macht. Um korrekte Ergebnisse mit dieser Technik erzielen zu können, dürfte der Filter allerdings keine feste Breite besitzen, sondern müsste adaptiv sein, was allerdings eine Untersuchung der Szene, mit dem damit verbundenen Mehraufwand nötig machen würde [MT05].

Bei der hier genutzten Technik wird die Szenentiefe durch Skalierung reduziert. Dadurch wird nicht nur das Aliasing verringert, sondern auch den Bereich im Datensatz vergrößert,

der scharf dargestellt wird. Zusätzlich wird durch Oversampling und Kombination der Oversampling-Ansichten implizit Unschärfe in kritischen Bereichen erzeugt. Zudem kann Aliasing verringert werden, indem eine simulierte Schärfentiefe auf die Szene Angewendet wird.

Es gibt Möglichkeiten das Oversampling adaptiv zu implementieren, wie z. B. Hachisuka et al. [HJW<sup>+</sup>08], die nützlich werden, wenn die Renderingzeit von zentraler Bedeutung ist.

Darüber hinaus existieren weitere Techniken, welche das Rendering von multiplen Ansichten beschleunigen. Auch besteht die Möglichkeit aus einer Ansicht, eine andere mittels Transformation zu gewinnen [AH93]. Andersson et al. [AJM<sup>+</sup>11] schlagen einen Algorithmus vor, der durch Wiederverwendung von Shadern und Kantenerkennung sowohl schneller ist, als auch Aliasing reduziert.

Die Beschleunigung des Renderings spielt bei dieser Arbeit keine wichtige Rolle, da diese Arbeit sich auf den Vergleich von Linsenrasterdisplays mit normalen Drucken konzentriert. Tsuboi et al. [TKH09] untersuchen wie viele Informationen dem Benutzer auf einem Linsenrasterdisplay, im Gegensatz zu einem 2D-Bild, vermittelt werden können. Dazu zeigen sie den Probanden ein Linsenrasterdisplay und lassen diese danach auf einem 2D-Bildschirm, das Bild der selben Szene in der Auflösung einstellen, die diese meinen auf dem Linsenrasterdisplay wahrgenommen zu haben. Das Resultat ihrer Evaluation ist, dass ein Linsenrasterdisplay dem Benutzer mehr Informationen übermitteln kann. Dieses Ergebnis kommt alleine durch die Ermittlung der wahrgenommenen Auflösung zustande.

Hier wird hingegen besonders darauf eingegangen, ob das Linsenrasterdisplay Vorteile gegenüber einem 2D-Bild, in Bezug auf die Erfassung eines Datensatzes, hat. Dies wird in einer Pilotstudie näher untersucht.

## 3 Physikalische Grundlagen der Optik

Um die Funktionsweise eines Linsenrasterdisplays erklären zu können, sind Grundlagen der Optik nötig. Besonders wichtig sind die Grundlagen der Strahlenoptik. Die Wellenoptik, die verschiedene physikalische Phänomene, wie z. B. die Beugung und Interferenz erklärt, wird hier nicht erläutert.

### 3.1 Strahlenoptik

Der Strahlenoptik, auch geometrische Optik genannt, liegt die Annahme zu Grunde, dass sich Licht, ausgehend von der Lichtquelle, strahlenförmig im Raum ausbreitet. Heinz Haferkorn hat dazu vier Axiome formuliert, deren Aussagen im Folgenden zusammengefasst werden:

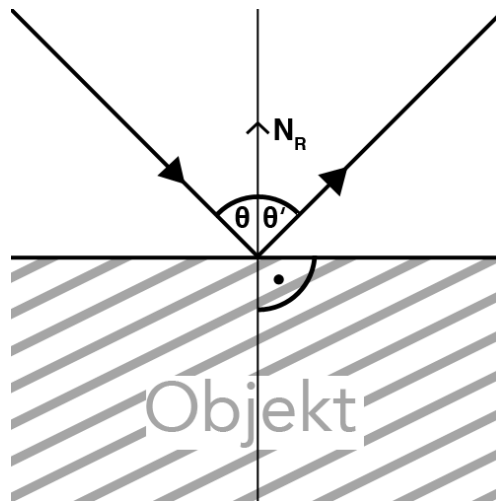
Lichtstrahlen sind im homogenen Medium gerade. Trifft ein Lichtstrahl auf ein Objekt oder ein anderes Medium, wird der Lichtstrahl an der Grenzfläche, abhängig von den Materialeigenschaften des Objektes oder des Mediums, reflektiert und gebrochen. Es gilt die Helmholtz Reziprozität [SCG<sup>+</sup>05], das heißt, dass es unbedeutend ist, aus welcher Richtung der Strahlengang verfolgt wird. Lichtstrahlen, die einen Schnittpunkt haben, haben keine Wirkung auf einander. [Haf94]

Die Interaktionen der Strahlen, an den oben beschriebenen Grenzflächen, sind die Folgenden:

1. Reflexion
2. Brechung
3. Absorption

Die drei dazugehörigen Regeln ermöglichen, zusammen mit den vier Axiomen, die komplette Strahlenoptik, die selbst aber nur eine Vereinfachung darstellt und nicht alle Phänomene der physikalischen Optik erklären kann (s. o.).

Farben sind ein Resultat der verschiedenen Wellenlängen des Lichts. Die Strahlenoptik beschäftigt sich nicht mit Wellenlängen, da diese zur Wellenoptik gehören. Um mit der Strahlenoptik verschiedene Farben darstellen zu können, wird folgende Annahme getroffen: Eine Farbe kann als Komposition von den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau dargestellt werden. Jede Farbe wird ihrem eigenen Farbkanal zugeordnet und getrennt behandelt. Ein



**Abbildung 3.1:** Darstellung zum Reflexionsgesetz.  $\epsilon = -\epsilon'$  (hier:  $\theta$  statt  $\epsilon$  und  $\theta'$  statt  $\epsilon'$ ) [Haf94], wobei  $\theta$  der Winkel ist, den der einfallende Strahl mit der Normalen  $N_R$  der Oberfläche, am Punkt an dem der Strahl auf die Oberfläche trifft, einschließt und  $\theta'$  der Winkel, den der ausfallende Strahl mit der Normalen  $N_R$  einschließt.

Strahl  $S$  transportiert nur eine der Farben und transportiert damit nur eine Intensität  $I$ . Für jeden ursprünglichen Strahl  $S_u$  in Richtung  $R$ , wird für jeden Farbkanal getrennt ein Strahl  $S_x$  in Richtung  $R$  verfolgt, wobei  $x \in \{\text{Rot, Grün, Blau}\}$ . Wird im Folgenden von einem Strahl gesprochen, ist ein monochromer Strahl gemeint. Für die Farben aller drei Farbkanäle sind die Regeln für die Interaktion näherungsweise die Gleichen. Nur die Brechungsindizes sind von der Wellenlänge abhängig.

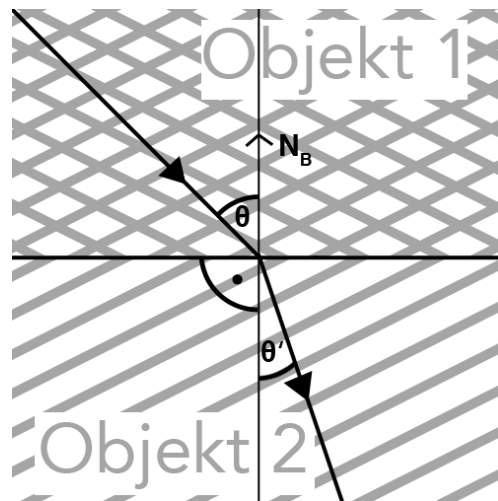
### 3.1.1 Reflexion

Ein Strahl, der auf ein Objekt trifft, wird reflektiert, falls das Objekt aus einem reflektierenden Material besteht. Die Intensität des reflektierten Strahls hängt dabei von den Materialeigenschaften des getroffenen Objektes ab. Das Reflexionsgesetz (siehe 3.1) lautet:

„Der Lichtstrahl bleibt in der Einfallsebene. Einfalls- und Reflexionswinkel sind durch  $\epsilon = -\epsilon'$  (hier:  $\theta$  statt  $\epsilon$  und  $\theta'$  statt  $\epsilon'$ ) verknüpft.“ [Haf94]

Wobei  $\theta$  der Einfallswinkel, der vom einfallenden Strahl mit der Normalen  $N_R$  der Oberfläche eingeschlossen wird, und  $\theta'$  der Reflexionswinkel, der vom ausfallenden Strahl mit  $N_R$  eingeschlossen wird, ist (siehe Abb.3.1).

Durch diese Regel lassen sich sowohl spekulare Reflexionen, wie sie z. B. an Spiegeln auftreten, als auch diffuse Reflexionen erklären. Bei diffusen Reflexionen besitzt das Objekt eine raue Oberfläche und reflektiert nah beieinander parallel eintreffende Strahlen in voneinander unabhängige Richtungen.



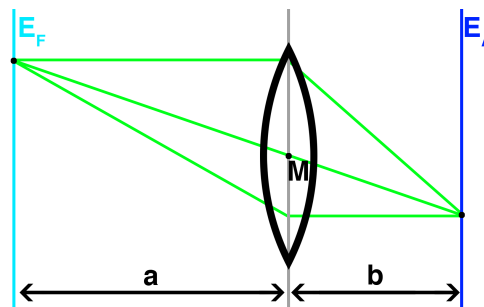
**Abbildung 3.2:** Darstellung zum Brechungsgesetz. Es gilt  $\frac{\sin \epsilon}{\sin \epsilon'} = \frac{n}{n'}$  (hier:  $\theta$  statt  $\epsilon$  und  $\theta'$  statt  $\epsilon'$ ) [Haf94], wobei  $\theta$  der Winkel ist, den der einfallende Strahl mit der Normalen  $N_B$  der Oberfläche, am Punkt, an dem der Strahl auf die Oberfläche trifft, einschließt und  $\theta'$  der Winkel, den der ausfallende Strahl mit der inversen Normalen  $N_B$  einschließt. Objekt 1 hat den Brechungsindex  $n$  und Objekt 2 den Brechungsindex  $n'$ .

### 3.1.2 Brechung

Damit Brechung stattfinden kann, muss das Objekt, auf welches der Strahl trifft, bzw. das Material, aus welchem das Objekt besteht, Licht transmittieren können. Der Strahl trifft auf die Oberfläche und wird gebrochen, wodurch die Richtung des gebrochenen Strahls eine andere sein kann. Die Intensität des gebrochenen Strahls hängt von den Materialeigenschaften des getroffenen Objektes ab. Das Brechungsgesetz (siehe Abb.3.2) ist wie folgt definiert [Haf94]:

„Der Lichtstrahl bleibt in der Einfallsebene. Einfalls- und Brechungswinkel sind verknüpft durch  $\frac{\sin \epsilon}{\sin \epsilon'} = \frac{n}{n'}$  (hier:  $\theta$  statt  $\epsilon$  und  $\theta'$  statt  $\epsilon'$ ).“ [Haf94]

Wobei  $\theta$  der Winkel zwischen dem eintreffenden Strahl und der Normalen  $N_B$  der Oberfläche, an dem Punkt an dem der Strahl auf das Objekt trifft und  $\theta'$  der Winkel zwischen dem gebrochenen Strahl und der inversen Normalen  $N_B$  ist.  $n$  ist der Brechungsindex des Mediums bzw. des Materials des Objektes, in welchem der einfallende Strahl sich ausbreitet.  $n'$  ist der Brechungsindex des Mediums bzw. des Materials des Objektes, in dem sich der gebrochene Strahl ausbreitet.



**Abbildung 3.3:** Die scharfe Abbildung einer Fokusebene  $E_F$  auf eine Ebene  $E_A$  mittels einer Linse. Dabei ist  $a$  der Abstand der Ebene  $E_F$  von der Linse und  $b$  der Abstand der Ebene  $E_A$  von der Linse.

### 3.1.3 Absorption

Die Intensität des gebrochenen Strahls  $I_G$  und die Intensität des reflektierten Strahls  $I_R$  müssen aufaddiert nicht die Intensität des eintreffenden Strahls  $I_E$  ergeben. Ausgehend von einem nicht emittierenden Objekt, darf die Intensität  $I_R + I_G$  jedoch niemals größer sein als  $I_E$ .

$$I_E \geq I_R + I_G$$

Die Lichtabsorption  $A$  ergibt sich also folgendermaßen:

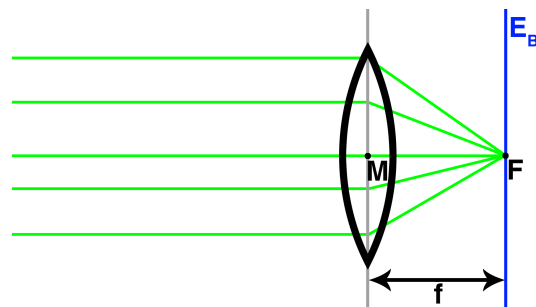
$$A = I_E - (I_R + I_G)$$

## 3.2 Dünne Linsen

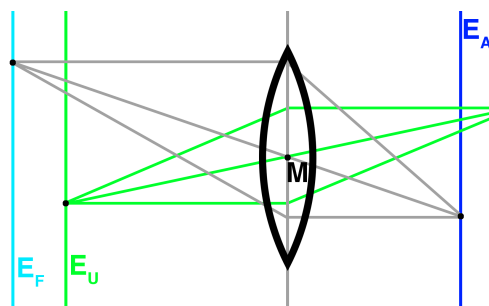
Eine Linse ist ein lichtdurchlässiges Objekt, welches durch Brechung, den Strahlengang des Lichtes, welches auf sie trifft, ändern kann. Wie das Licht im Raum umverteilt wird, hängt unter anderem von der Form der Linse ab. Im Folgenden werden als vereinfachende Annahme nur dünne Linsen behandelt.

Dünne Linsen brechen das Licht, so dass alle Elemente, die sich innerhalb des Sichtfeldes der Linse befinden, aus einer Fokusebene  $E_F$  exakt Punkt-gespiegelt auf eine Ebene  $E_A$  abgebildet werden, solange keine Elemente zwischen der Linse und den Ebenen die Abbildung stören (siehe Abb.3.3). Dabei gilt, dass die Fokusebene  $E_F$  und die Ebene  $E_A$  im Raum orthogonal zur optischen Achse der Linse liegen. Der Abstand der Ebene  $E_A$  von der Linse kann durch die Brennweite und den Abstand der Fokusebene  $E_F$  von der Linse berechnet





**Abbildung 3.4:** Parallel einfallende Strahlen, die parallel zur optischen Achse der Linse verlaufen, kreuzen sich nach der Brechung durch die Linse im Brennpunkt  $F$  der Brennebene  $E_B$ . Der Abstand zwischen dem Mittelpunkt  $M$  der Linse und dem Brennpunkt  $F$  ist die Brennweite  $f$ .



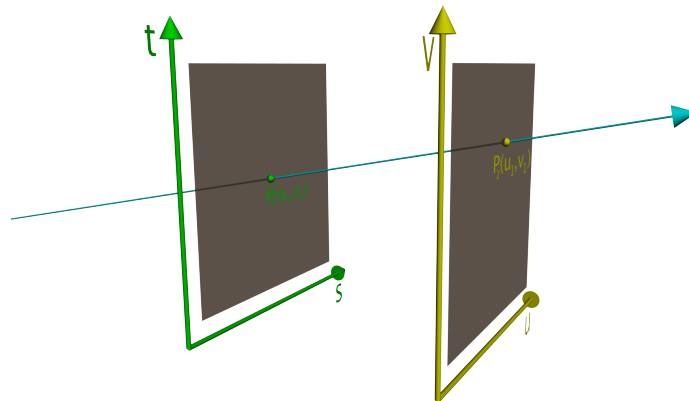
**Abbildung 3.5:** Alle Elemente aus der Ebene  $E_U$  werden unscharf auf die Ebene  $E_A$  abgebildet, da sich die Strahlen nach der Brechung durch die Linse nicht in der Ebene  $E_A$  kreuzen.

werden. Werden Elemente aus anderen Ebenen, die parallel zur Fokusebene liegen, auf die selbe Ebene  $E_A$  abgebildet, dann werden sie unscharf abgebildet.

Die Brennweite  $f$  einer Linse definiert sich durch den Abstand des Brennpunktes  $F$  zum Mittelpunkt  $M$  der Linse. Der Brennpunkt  $F$  ist der Punkt, an dem sich parallel einfallende Strahlen, die parallel zur optischen Achse der Linse eintreffen, nach der Brechung durch die Linse in einem Punkt kreuzen. Die Brennebene  $E_B$  ist die Ebene, die im Raum orthogonal zur optischen Achse der Linse liegt und durch den Brennpunkt geht (siehe Abb.3.4).

Eine Fokusebene  $E_F$ , von der die Strahlen ausgehen, müsste also in unendlicher Entfernung liegen, damit die Strahlen parallel eintreffen und sich nach der Brechung durch die Linse in der Brennebene  $E_B$  kreuzen.

Es gilt für die scharfe Abbildung von einer Fokusebene  $E_F$  auf eine Ebene  $E_A$  durch die Linse, dass die Elemente aus einer Ebene  $E_U$ , die parallel zur Ebene  $E_F$  ist, aber einen Abstand  $d > 0$  von ihr hat, unscharf auf die Ebene  $E_A$  abgebildet werden (siehe Abb.3.5).



**Abbildung 3.6:** „light slab representation“ [LH96]: Der Strahl wird durch die Schnittpunkte  $P_1$ , mit der  $s, t$ -Ebene, und  $P_2$ , mit der  $u, v$ -Ebene, parametrisiert.

Dies geschieht, da sich die verschiedenen, durch die Linse gebrochenen Lichtstrahlen nicht mehr in der Ebene  $E_A$  in einem Punkt treffen. Das bedeutet, dass ein Punkt auf einen Kreis abgebildet wird, der als Zerstreungskreis bezeichnet wird. Wird der Abstand  $d$  größer, wird auch der Durchmesser des Zerstreungskreises größer und damit nimmt der Grad der Unschärfe zu.

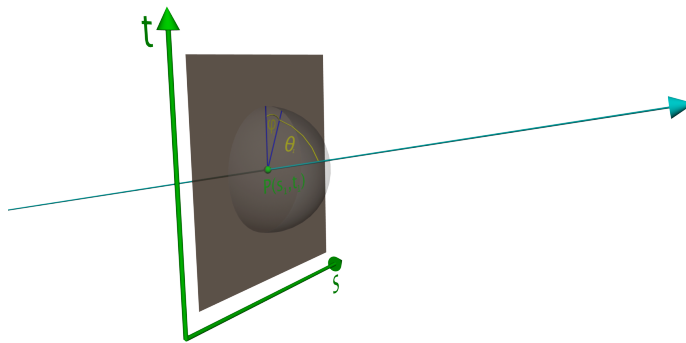
Der Abstand des Brennpunktes von der Linse, hängt von ihrer Krümmung sowie vom Brechungsindex ihres Materials ab. Bei dünnen Linsen wird die Krümmung oft vernachlässigt, da die Linsen näherungsweise flach sind. Dabei gilt die Annahme, dass an einer Ebene gebrochen wird. Es gilt folgende Gleichung [Haf94]:

$$(3.1) \quad \frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Wobei  $a$  der Abstand der Linse von der Fokusebene und  $b$  der Abstand der Linse von der Ebene, auf die die Fokusebene durch die Linse scharf abgebildet wird, ist (siehe Abb.3.3).  $f$  ist die Brennweite. Es gilt zusätzlich, dass die Strahlen, die durch den Mittelpunkt einer Linse gehen, durch diese nicht abgelenkt werden.

### 3.3 Lichtfelder

Ein Lichtfeld [LH96] oder Lumigraph [GGSC96] kann eine Szene, ausgehend von der Vereinfachung auf die Strahlenoptik und davon, dass die Szene nur von außerhalb betrachtet wird, beschreiben. Ermöglicht wird das durch die Parametrisierung, die Levoy et al. die „light slab representation“ [LH96] nennen (siehe Abb.3.6).



**Abbildung 3.7:** Parametrisierung des Strahls durch den Schnittpunkt  $P$  mit einer Ebene und den Schnittpunkt mit der Hemisphäre über dem Punkt  $P$ , definiert durch die Polarkoordinaten  $\theta_1$  und  $\phi_1$ ).

Der Lichtstrahl ist durch die Schnittpunkte mit zwei Ebenen eindeutig bestimmt. Die erste Ebene wird üblicherweise durch  $u$  und  $v$  parametrisiert, die zweite durch  $s$  und  $t$ , wobei der Wertebereich der vier Parameter jeweils von 0 bis 1 geht.[LH96]

Die Lage eines Strahls  $S_0$  im Raum ergibt sich also durch die Werte  $(u_0, v_0, s_0, t_0)$ .

Eine andere Parametrisierung ist ebenfalls möglich (siehe Abb.3.7). Sie benötigt nur eine Ebene, die ebenfalls durch  $s$  und  $t$  parametrisiert wird. Zusätzlich müssen die Winkel  $\theta$  und  $\phi$  erfasst werden. Diese Winkel sind Polarkoordinaten auf einer Hemisphäre und geben den Schnittpunkt des Strahls mit der Hemisphäre an.

Das heißt ein Strahl  $S_1$  ist definiert durch den Schnittpunkt mit der Ebene  $P(s_1, t_1)$  und den Schnittpunkt mit der Hemisphäre  $(\theta_1, \phi_1)$ . Der Mittelpunkt der Hemisphäre liegt ebenfalls im Punkt  $P(s_1, t_1)$ .

Lichtfelder in der realen Welt sind kontinuierlich. Diskretisierungen und die Probleme, die sich daraus ergeben, werden im Abschnitt 4.3.3 behandelt.



## 4 3D-Darstellungstechniken

Es gibt verschiedene Techniken, die es ermöglichen einen dreidimensionalen Eindruck einer Szene zu gewinnen. Einen kurzen Überblick über verschiedene Verfahren bietet dieses Kapitel.

### 4.1 Head-Mounted-Display (HMD)

Um ein HMD zur 3D-Darstellung verwenden zu können, muss es sich um ein HMD mit einem Display pro Auge, oder ein einziges Display, von dem jedes Auge nur einen Bereich sieht, der mit dem Bereich des anderen Auge disjunkt ist, handeln. Auf den Displays, bzw. den Bereichen des Displays, werden unterschiedliche Ansichten der Szene wiedergegeben, die entsprechend für das jeweilige Auge aufgenommen oder erstellt worden sind.

### 4.2 Brillen-Techniken

#### 4.2.1 Farbanaglyphenprojektion

Für binokulares Sehen, muss der Betrachter auf jedem Auge eine passende Ansicht der selben Szene sehen. Die Farbanaglyphenprojektion trennt die verschiedenen Bilder nach Wellenlänge. Es wird z. B. ein rot eingefärbtes Bild für das eine Auge und ein grün eingefärbtes Bild für das andere Auge auf die Leinwand projiziert. Der Betrachter trägt eine Brille, die für jedes Auge einen Farbfilter für die jeweilige Farbe hat.

Das grün gefärbte Bild, wird durch einen grünen Farbfilter herausgefiltert und das Rot, des rot gefärbten Bildes, wird schwarz. Vor dem anderen Auge ist ein roter Farbfilter, der äquivalent funktioniert. Somit sieht ein Auge jeweils nur eine Ansicht. Mit den passenden Ansichten, lässt sich dadurch ein 3D-Eindruck erzeugen.

Das Verfahren funktioniert nicht nur mit Rot-Grün Brillen. Es gibt noch verschiedene, anders gefärbte Brillen, wobei zu beachten ist, dass das Bildmaterial richtig eingefärbt sein muss, damit es in Kombination mit der jeweiligen Brille funktioniert.

Bei dieser Arbeit werden in der Pilotstudie Farbanaglyphenbilder eingesetzt, um die Linsenrasterdisplays mit ihnen zu vergleichen. Es wird eine Rot-Cyan Brille verwendet. Die Ansichten für die beiden Augen werden in POVray [POV] gerendert. Auf die Farbkanäle

des linken Bildes  $I_L$  und des rechten Bildes  $I_R$  werden Pixelweise die folgende Operation angewendet:

$$(4.1) \begin{pmatrix} r_{I_{A1}} \\ g_{I_{A1}} \\ b_{I_{A1}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_{I_L} \\ g_{I_L} \\ b_{I_L} \end{pmatrix}$$

$$(4.2) \begin{pmatrix} r_{I_{A2}} \\ g_{I_{A2}} \\ b_{I_{A2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_{I_R} \\ g_{I_R} \\ b_{I_R} \end{pmatrix}$$

Die zwei Ergebnisbilder  $I_{A1}$  und  $I_{A2}$  sind nun in korrekterweise eingefärbt und müssen nun noch mittels Addition kombiniert werden:

$$(4.3) \begin{pmatrix} r_{I_A} \\ g_{I_A} \\ b_{I_A} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{I_{A1}} \\ g_{I_{A1}} \\ b_{I_{A1}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} r_{I_{A2}} \\ g_{I_{A2}} \\ b_{I_{A2}} \end{pmatrix}$$

Die fertige Farbanaglyphenbild  $I_A$  kann nun mit der Rot-Cyan Brille betrachtet werden. Die Farbanaglyphenprojektion wird den passiven Stereo-Verfahren zugeordnet, da in der Brille keine (aktive) Elektronik benötigt wird. Dies ist die Technik, die in den 1950er-Jahren eine Zeit lang in den Kinos verwendet wurde [Cem].

### 4.2.2 Polarisationsfiltertechnik

Polarisationsfiltertechniken bedienen sich der Welleneigenschaften des Lichts. Licht kann verschieden polarisiert werden. Der Betrachter trägt eine Brille, die für das jeweilige Auge speziell polarisierte Licht hindurch lässt und das Licht des anderen Auges herausfiltert. Die zwei Ansichten, die für die stereoskopische Wahrnehmung eines Bildes nötig sind, werden in der jeweiligen Polarisation abgestrahlt. Das Verfahren zählt, wie die Farbanaglyphenprojektion, zu den passiven Stereo-Verfahren. Es wird derzeit in den Kinos für die Wiedergabe von 3D-Inhalte verwendet.

### 4.2.3 Shuttertechnik

Die Shuttertechnik gehört zu den aktiven Stereo-Verfahren, da die benötigte Brille, den Augen abwechselnd die Sicht versperrt. Das geschieht in Synchronisation mit einem Wiedergabegerät, dass während das linke Auge nichts sieht, dem rechten Auge die Ansicht der Szene für das rechte Auge zeigt. Das Selbe geschieht umgekehrt für das andere Auge. Durch sehr hohe Wiederholungsfrequenzen nimmt das Auge die Abdunklung nicht wahr, ähnlich wie bei einem laufenden Ventilator die Rotorblätter nicht mehr wahrgenommen werden.

## 4.3 Brillenlose Techniken

Techniken, die keine Brille, zusätzlichen Geräte oder Objekte, außer dem Wiedergabegerät an sich benötigen, werden autostereoskopische Verfahren genannt.

### 4.3.1 Holografie

Die Holografie wird durch den Wellencharakter des Lichts möglich. Um ein holografisches Bild zu erzeugen, muss zuerst ein kohärentes, monochromes Licht auf das Objekt gerichtet werden und das Diffraktionsmuster, das sich durch die Interferenz zwischen dem reflektierten Licht und dem Licht, das direkt von der Lichtquelle abgestrahlt wird, ergibt, muss durch eine Fotoplatte aufgezeichnet werden. Strahlt eine Lichtquelle mit den gleichen Eigenschaften, wie die der Lichtquelle, die zur Aufzeichnung des Objektes verwendet wurde auf die Fotoplatte, wird das Licht durch das aufgenommene Diffraktionsmuster gebeugt und es entsteht das selbe Lichtfeld, das vom Objekt abgestrahlt wurde.[Gab49]

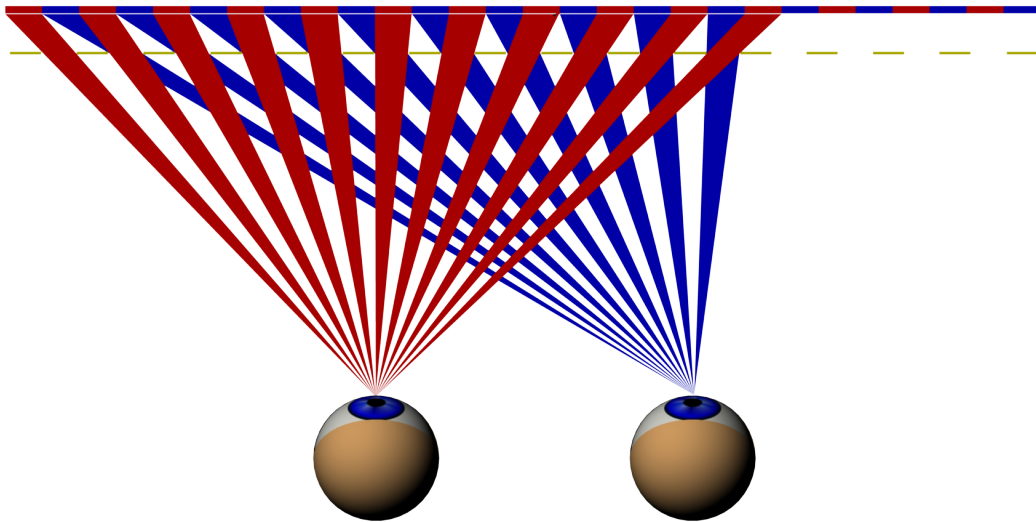
### 4.3.2 Parallaxbarrierentechnik

Diese Technik benutzt eine Barriere vor dem Display, die so positioniert wird, dass aus einer fixen Betrachterposition jedes Auge abwechselnd eine Pixelreihe sieht. Diese Reihen zeigen die zugehörigen Ansichten der Szene, so dass ein dreidimensionaler Eindruck der Szene entsteht (siehe Abb.4.1).

### 4.3.3 Linsenrasterdisplays

Linsenrasterdisplays geben eine Diskretisierung eines Lichtfeldes aus. Häufig werden dabei nur drei Dimensionen wiedergegeben, indem keine runden Linsen, sondern Linsen in Form eines halben Zylinders verwendet werden.

Vor dem Display befindet sich ein Linsenraster, das durch Lichtbrechung dafür sorgt, dass



**Abbildung 4.1:** Funktionsweise der Parallaxbarriertechnik. Dieses Display zeigt die Ansicht für das linke Auge (rot) und die für das rechte Auge (blau). Die Parallaxbarriere (gelb) verdeckt für das jeweilige Auge die Ansicht des anderen Auges.

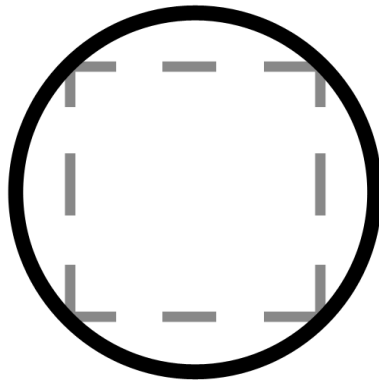
aus verschiedenen Betrachtungspositionen, verschiedene Bildpunkte wahrgenommen werden. Es können statt runden oder quadratischen Linsen (siehe Abb.4.2) auch Linsen in Form eines halben Zylinders verwendet werden, so dass nur noch 3 Dimensionen wiedergegeben werden können.

Die Mitte der runden und quadratischen Linsen hat eine Position  $P$  auf dem Display, die mit  $x, y$  parametrisiert wird. Der Punkt  $B$  von dem aus die Betrachtung stattfindet, bildet mit der Position der Linse  $x, y$  eine Gerade im Raum. Diese Gerade kann anhand des Punktes  $x, y$  als Ursprung und den Winkeln  $\theta$  und  $\phi$  als Polarkoordinaten auf einer Hemisphäre mit dem Mittelpunkt  $x, y$  parametrisiert werden (siehe Abb.4.3).

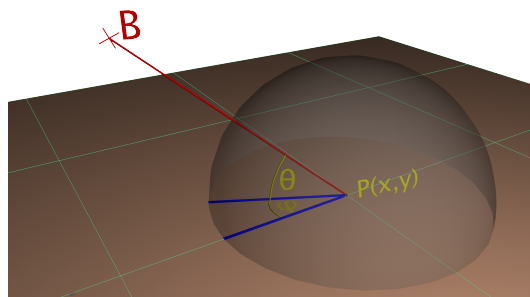
Durch den Einsatz von Linsen, in Form eines halben Zylinders (siehe Abb.4.4), wird ein Freiheitsgrad entfernt und es bleiben zur Parametrisierung nur  $x$ , welches die Mitte der Linse definiert,  $y$ , welches die selbe Funktion wie in einem 2D-Bild hat und  $\theta$ , allerdings kein  $\phi$ .

Das Sichtfeld der Linsen begrenzt die Ausgabe des Lichtfeldes und limitiert den Radius, in dem die Szene korrekt wahrgenommen werden kann. Bewegt sich der Betrachter aus dem Sichtfeld, kommt es zu Sprüngen, da außerhalb des Sichtfelds die Linsen Bildpunkte von benachbarten Linsen ausgeben (siehe Abb.4.5).





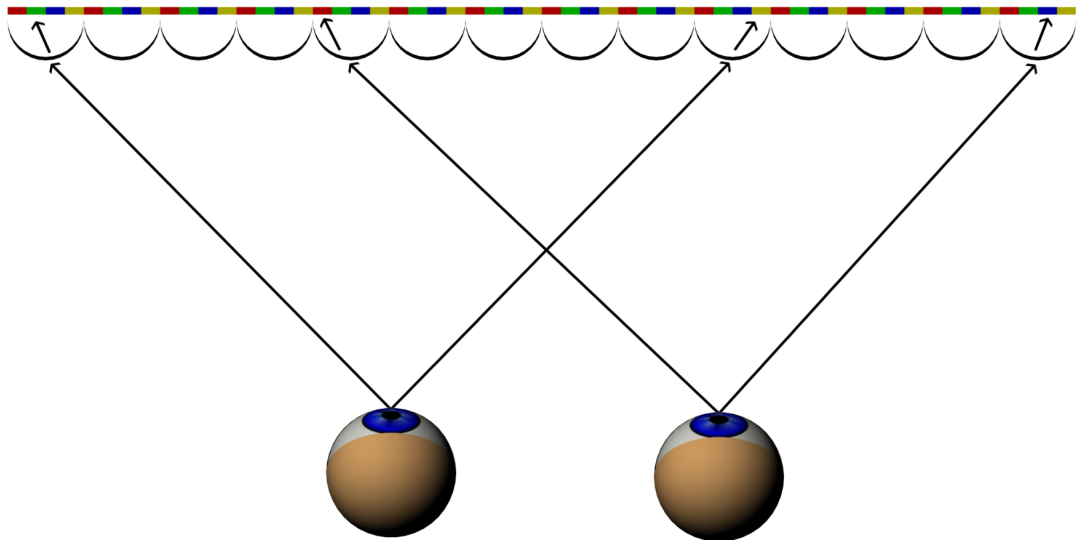
**Abbildung 4.2:** Schwarz: Eine runde, bikonvexe Linse. Grau: Wird die runde Linse entlang dieser Kanten ausgeschnitten, erhält man eine Linse in quadratischer Form. Wird in dieser Arbeit von quadratischen Linsen gesprochen, sind solche Ausschnitte aus runden Linsen gemeint.



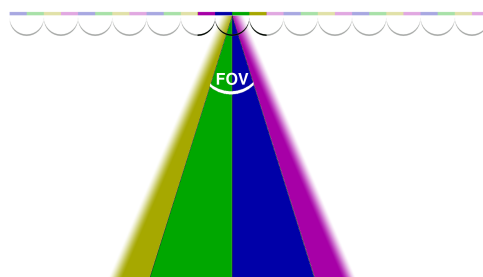
**Abbildung 4.3:** Parametrisierung eines Strahls (rot) von einem Punkt  $P$  in der Ebene (braun) zum Punkt  $B$  (rot).  $x$  und  $y$  in der Ebene legen den Ursprung des Strahls fest und die Richtung wird durch die Kugelkoordinaten  $\theta$  und  $\phi$  auf einer Hemisphäre definiert (gelb).

Die Diskretisierung hat zur Folge, dass das Lichtfeld nicht kontinuierlich wiedergegeben und wahrgenommen wird. Da Druckgeräte nur eine beschränkte Anzahl von Punkten pro Zoll (dpi) auf ein Medium drucken und andere Wiedergabegeräte meist eine feste Anzahl von Pixel pro Zoll (ppi) ausgeben können, muss bei Linsenrasterdisplays ein Kompromiss zwischen (3D-)Auflösung und Anzahl der Ansichten gefunden werden.

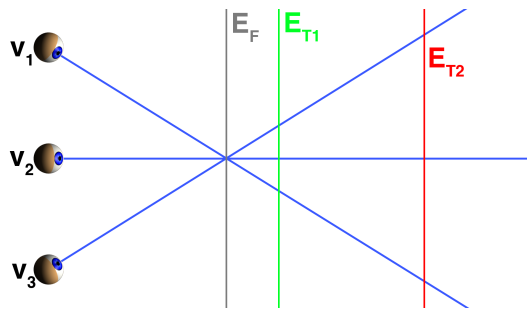
Eine hohe Auflösung ist wünschenswert, da dadurch die einzelnen Bildpunkte weniger stark wahrgenommen werden und die Szene detailreicher dargestellt werden kann. Die Erhöhung der Auflösung ist sinnvoll bis zu der maximalen Auflösung, die das menschliche Auge, aus der für die Betrachtung vorgesehene Entfernung, wahrnehmen kann. Eine hohe Anzahl von Ansichten pro Linse ist deswegen wünschenswert, weil es sonst zu Sprüngen zwischen den einzelnen Ansichten kommen kann, insbesondere dann, wenn das Sichtfeld der Linsen groß ist und die Szene eine große Tiefe hat (siehe Abb.4.6). Gleichzeitig kann durch die Sprünge



**Abbildung 4.4:** Funktionsweise eines Linsenrasterdisplays. Dieses Display enthält vier Ansichten. Ansicht 1 ist rot, Ansicht 2 ist blau, Ansicht 3 ist grün und Ansicht 4 ist gelb gefärbt.



**Abbildung 4.5:** Die Bereiche, in welchen eine Ansicht aus Sicht des Betrachters zu sehen ist, sind hier entsprechend der Ansicht eingefärbt. FOV gibt dabei das Sichtfeld der Linse an.



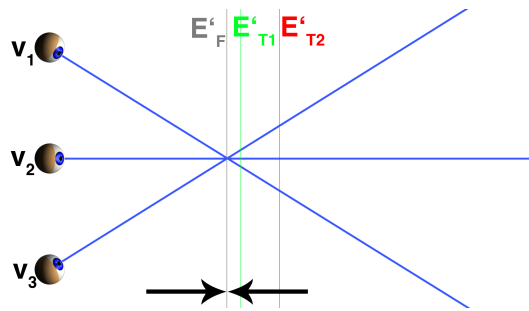
**Abbildung 4.6:** Der Abstand der Strahlen von verschiedenen Ansichten  $v_1$ ,  $v_2$  und  $v_3$ , die durch den selben Punkt in der Fokusebene  $E_F$  gehen, nimmt mit dem Abstand zur Fokusebene zu. Der Abstand zwischen den Strahlen, ist bei den Schnittpunkten mit der Ebene  $E_{T1}$  im Vergleich zu denen mit der Ebene  $E_{T2}$ , klein. Die Strahlen einer Ansicht springen zur nächsten. Das wird umso deutlicher, je größer der Abstand zwischen den Strahlen ist. Liegen also Elemente in einer Ebene in großer Tiefe (wie z. B.  $E_{T2}$ ), kann Aliasing auftreten.

Aliasing auftreten, wenn die Betrachtungsposition genau so gewählt ist, dass durch die Linse der Übergang zwischen 2 oder 4 Bildpunkten (beim 4D-Linsenrasterdisplay) oder zwischen 2 Bildpunktzeilen (beim 3D-Linsenrasterdisplay) zu sehen ist.

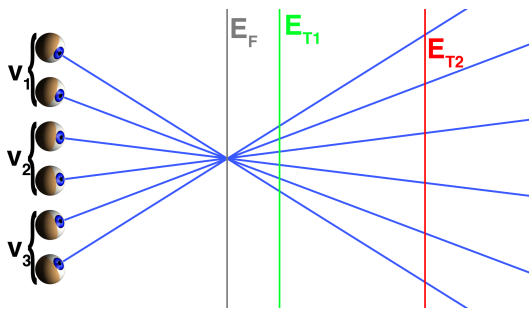
Da die maximal mögliche Auflösung des Displays durch den Drucker oder das Wiedergabegerät feststeht, kann man nur die Linsengröße variieren. Ist z. B. ein Drucker mit 1200 dpi und ein Linsenraster mit 100 lpi (Linsen pro Zoll) gegeben, dann entspricht die vom Benutzer wahrgenommene Auflösung den 100 lpi, wobei pro Linse 12 Ansichten vorhanden sind. Wählt man ein Linsenraster mit weniger lpi, ist die wahrgenommene Auflösung niedriger, dafür sind mehr Ansichten pro Linse vorhanden, was das Aliasing reduziert (wenn das Sichtfeld der beiden Linsenraster das selbe ist). Wird ein Linsenraster mit mehr lpi gewählt, erhöht sich die wahrgenommene Auflösung, allerdings auch das Aliasing (bei gleich bleibendem Sichtfeld).

Um bei einem großen Sichtfeld und einer großen Szenentiefe keine Aliasing-Effekte durch Sprünge zwischen den Ansichten zu bekommen, kann die Szenentiefe reduziert werden, indem die gesamte Szene entlang der Blickrichtung gestaucht wird (siehe Abb.4.7). Das reduziert aber natürlich gleichzeitig den 3D-Effekt des Linsenrasterdisplays.

Statt die Szene zu stauchen, kann auch ein kleineres Sichtfeld auf das tatsächliche Sichtfeld des Linsenrasterdisplays abgebildet werden. Das bedeutet, es wird bei der Berechnung der Kamerapositionen (siehe Kapitel 5.1) nicht das tatsächliche Sichtfeld, sondern ein kleineres verwendet. Als Folge daraus sind die Kamerapositionen näher bei einander und das Aliasing wird reduziert. Bei der Wiedergabe auf dem Linsenrasterdisplay wird der 3D Effekt reduziert, da die Szene mit reduzierter Disparität wahrgenommen wird. In dieser Arbeit wird die Stauchung der Szene der Abbildung eines kleineren Sichtfelds auf das des Linsenrasterdisplays vorgezogen, da somit das korrekte Sichtfeld verwendet werden kann.



**Abbildung 4.7:** Durch das Skalieren entlang der Orthogonalen der Fokusebene  $E_F$ , wird die Tiefe der Szene reduziert (im Vergleich zu Abb.4.6). Dadurch werden die Sprünge zwischen den Strahlen der verschiedenen Ansichten auf den skalierten Ebenen kleiner. Durch die reduzierte Tiefe wird aber auch der 3D-Effekt abgeschwächt.



**Abbildung 4.8:** Die Szene Abb.4.6 wird mit einfachem Oversampling abgetastet. Das heißt, es werden pro mit dem Linsenrasterdisplay auflösbarer Ansicht zwei Ansichten erzeugt und dann zu einer Einzigen kombiniert. Dadurch verschwimmen Elemente in Ebenen größerer Tiefe und das Aliasing wird reduziert.

Das Aliasing kann auch durch Oversampling reduziert werden. Dabei werden, zwischen den eigentlichen Ansichten, zusätzliche Ansichten verwendet. Die Ansichten werden mit den zugehörigen Oversampling-Ansichten kombiniert, was dazu führt, dass die Elemente, die vorher beim Wechseln der Ansichten gesprungen sind, verschwimmen (siehe Abb.4.8).

Ein Linsenrasterdisplay, das nur 3 Dimensionen eines Lichtfeldes wiedergeben kann, hat eine feste Fokusebene. Es ist möglich, durch Tiefenkarten einen Verwisch-Effekt direkt auf die Ansichten anzuwenden. Der Vorteil hierbei ist, dass dadurch die menschliche Wahrnehmung simuliert werden kann. Die Linse fokussiert auf eine Ebene und die dazu parallelen Ebenen sind, je nach ihrem Abstand von der Fokusebene und dem Abstand der Fokusebene zur Linse, unscharf. Da bei dieser Technik die Unschärfe zunimmt je weiter der Punkt von der Fokusebene entfernt ist, nimmt das Aliasing ab (siehe Kaptiel 5.5).

Es ist möglich, alle diese Techniken zur Reduzierung des Aliasings zu kombinieren.

## 5 Erzeugung von Bildern für Linsenrasterdisplays

Linsenrasterdisplays können eine Diskretisierung eines Lichtfeldes ausgeben. Ein Display gibt ein 2D-Bild aus. Auf dem Display ist ein Linsenraster angebracht, welches durch Brechung des Lichtes des 2D-Display ein Lichtfeld wiedergibt. Das 2D-Bild muss dafür die kompletten Informationen, die ausgegeben werden sollen, in korrekter Anordnung enthalten. Um das zu ermöglichen, muss das Linsenrasterdisplay kalibriert und die Szene auf bestimmte Weise aufgenommen werden. Damit kein Aliasing auftritt, werden zusätzliche Techniken, wie z. B. die Reduzierung der Szenentiefe, eingesetzt.

### 5.1 Kalibrierung und Raytracing

Die Linsenraster, die im Folgenden beschrieben werden, sind immer Linsenraster, die nur 3 Dimensionen eines Lichtfeldes wiedergeben können.

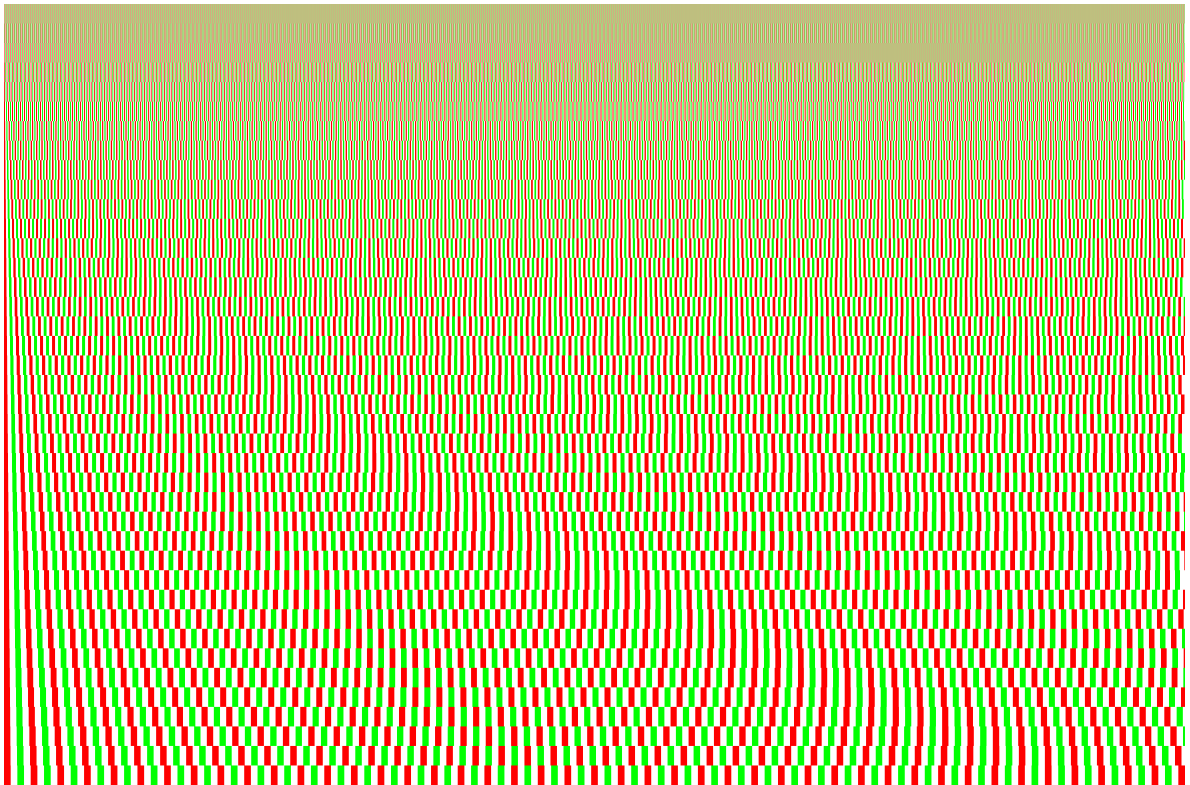
Dabei gilt es zuerst zu ermitteln, welche Auflösung das Linsenraster hat. Diese Angabe erhält man normalerweise beim Hersteller. Die Größe, in der die Auflösung angegeben wird, ist Linsen pro Zoll (lpi). Danach gilt es herauszufinden, welche Auflösung das Display wiedergeben kann. Beim Display kann es sich zum Beispiel um einen Monitor oder ein bedrucktes Medium handeln. Bei einem Monitor müssen dabei die Pixel pro Zoll (ppi) und bei einem bedruckten Medium die Punkte pro Zoll (dpi), die der Drucker maximal auflösen kann, ermittelt werden.

Die Formel

$$(5.1) \text{ ppl} = \frac{\text{Res}_{\text{Display}}}{\text{Res}_{\text{Lenticular}}}$$

beschreibt, wie aus der Auflösung des Displays  $\text{Res}_{\text{Display}}$  und der Auflösung des Linsenrasters  $\text{Res}_{\text{Lenticular}}$  die zu erwartende Anzahl Pixel- oder Punktreihen errechnet werden können, die pro Linse nötig sind. Die Einheit hierbei ist Pixel- bzw. Punktreihen pro Linse (ppl).

Es kann aber zum Einen die echte Auflösung von Druckern von der eingestellten Auflösung abweichen, zum Anderen gilt die oben genannte Formel nur für die Betrachtung eines Linsenrasterdisplays aus unendlicher Entfernung, da die Strahlen, vom Betrachter zu den einzelnen Linsen, dann parallel sind. Bei dieser Arbeit wird angenommen, dass ein Linsenrasterdisplay meistens aus Entfernungen von maximal einem Meter betrachtet wird.



**Abbildung 5.1:** Das verwendete Muster bietet die Möglichkeit das Herstellungsverfahren zu kalibrieren. Die Auflösung und Blockzeilenhöhe muss, entsprechend der Displayauflösung, gewählt werden. Die Anordnung der Farben in Blockzeilen entspricht der Farbenanordnung in Tab.5.1.

Aus diesen Gründen ist ein Testmuster nötig, um das Verfahren zu kalibrieren. Das Testmuster muss es möglich machen, durch die Betrachtung im Linsenrasterdisplay, eindeutig zu erkennen, ob der errechnete Wert korrekt ist oder wie er korrigiert werden muss.

In dieser Arbeit werden drei gut unterscheidbare Farben  $c_1, c_2, c_3$  und ein Muster wie folgt verwendet (siehe Abb.5.1):

Blockzeile	1. Spalte	2. Spalte	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.
1	$c_1$	$c_2$	$c_1$	$c_3$	$c_1$	$c_2$	$c_1$	$c_3$	$c_1$	$c_2$	$c_1$	$c_3$	...
2	$c_1$	$c_1$	$c_2$	$c_2$	$c_1$	$c_1$	$c_3$	$c_3$	...				
3	$c_1$	$c_1$	$c_1$	$c_2$	$c_2$	$c_2$	$c_1$	$c_1$	$c_1$	$c_3$	$c_3$	$c_3$	...
...	...												

**Tabelle 5.1:** Anordnung der Farben  $c_1, c_2, c_3$  für das Kalibrierungsmuster

Eine Blockzeile bezeichnet hier keine Pixel- bzw. Punktzeile, sondern eine, die aus mehreren, identischen Pixel- bzw. Punktzeilen besteht, so dass die Blockzeile gut erkannt und von den darüber und darunterliegenden einfach zu differenzieren ist.

Durch die Verwendung von drei Farben in der genannten Anordnung können die ppl und das Sichtfeld leichter bestimmt werden als das bei der Verwendung von nur zwei Farben möglich wäre, da dort jede Farbspalte von zwei Farbspalten mit der gleichen Farben eingeschlossen werden würde.

In einem Linsenrasterdisplay ist dieses Muster dazu in der Lage, dass aus einer Betrachtungsrichtung, eine der verschiedenen Blockzeilen komplett die Farbe  $c_1$  annimmt. Diese Blockzeile hat dann pro Linse zwei Farbspalten, nämlich  $c_1$  und entweder  $c_2$  oder  $c_3$ . Das wird möglich durch die Anordnung, bei der jede zweite Farbspalte die Farbe  $c_1$  hat.

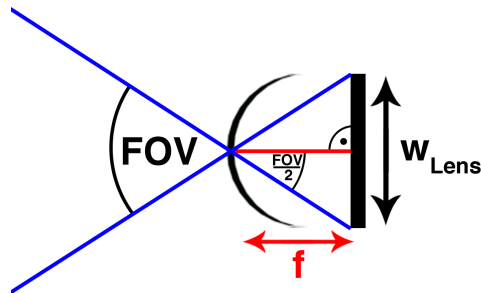
Die Blockzeilennummer mal zwei sollte die Blockzeilennummer ergeben, in der die Farben sich entsprechend dem Muster wiederholen, also  $c_1, c_2, c_1, c_3$  und diese Reihenfolge immer wieder. Dieses Muster sollte unabhängig von der Betrachtungsrichtung, solange das Sichtfeld der Linse nicht verlassen wird, erscheinen. Hier ist pro Linse nur eine Farbspalte vorhanden. Von den Blockzeilennummern lassen sich die Pixel- bzw. Punktzeilen pro Farbspalte ablesen. Daraus wiederum lassen sich die ppl berechnen. Nimmt man z. B. die Blockzeile, bei der genau eine Farbspalte pro Linse gegeben ist, sind die ppl genau die Blockzeilennummer.

Sollte es keine Blockzeile geben, in der pro Linse nur eine Farbspalte zu sehen ist, bedeutet das, dass das Linsenraster verschoben auf dem Display liegt. Kann das Linsenraster frei verschoben werden, ist die Behebung trivial. Ist das Linsenraster fest auf dem Display aufgebracht, muss das Kalibrierungsmuster angepasst werden. Anhand des bereits vorhandenen, verschobenen Linsenrasterdisplays kann der Bereich, in dem sich die gesuchte Blockzeile befindet, eingeschränkt werden. Haben z. B. drei nebeneinander liegende Linsen, unabhängig vom Betrachtungswinkel, die gleiche Farbe, sind die Farbspalten zu breit.

Die in Frage kommenden Blockzeilen werden nun alle wiederverwendet, wobei sie eine Pixelreihe nach rechts verschoben werden. Die Blockzeilen werden darunter ein weiteres Mal mit einer Verschiebung um zwei Pixelreihen nach rechts verwendet. Darunter wiederum mit einer Verschiebung um drei Pixelreihen usw. Die maximale Verschiebung ist durch die Blockzeilenanzahl des eingeschränkten Musters gegeben.

Wird dieses Muster nun auf dem Linsenrasterdisplay wiedergegeben, sollte es Blockzeilen geben, die sich wie bei einem nicht verschobenen Linsenraster verhalten (s. o.). Anhand der Position dieser Blockzeilen, kann die Anzahl der Pixelreihen, welche die Verschiebung ausmachen, ermittelt werden.

Durch das korrekt zum Linsenraster ausgerichtete Muster lässt sich ebenfalls das Sichtfeld der Linsen bestimmen. Betrachtet man die Blockzeile, bei der hinter jeder Linse nur eine Farbspalte vorhanden ist, erkennt man durch Drehung des Displays, um die Achse entlang der zylindrischen Linsen, ab welcher Gradzahl der Drehung das Bild plötzlich springt. Am einfachsten ist dies mit nur einem Auge zu erkennen. Gemessen wird der Winkel zwischen der Normalen des Displays und dem Sichtvektor auf das Display, nach der Drehung. Das Ergebnis sollte in beide Drehungsrichtungen dasselbe sein. Das Sichtfeld ist die Addition der Messungen in beide Richtungen, bzw. wenn das Ergebnis in beide Richtungen das Gleiche



**Abbildung 5.2:** Diese Abbildung zeigt die Größen, die benötigt werden, um die Brennweite  $f$  aus dem Sichtfeld FOV errechnen zu können.

ist, die Messung in eine Richtung mal zwei.

Da die Bilder des, in dieser Arbeit benutzten, Datensatzes mit einem Raytracer (POVRay [POV]) erstellt wurden, beziehen sich die nächsten Schritte spezifisch auf die Erstellung von Bildern für Linsenrasterdisplays mit Raytracern. Die Theorie dazu ist jedoch allgemein gültig.

Es wird angenommen, dass das Display hinter dem Linsenraster in der Brennebene der Linsen liegt. Das bedeutet, dass die Strahlen, die von einem Punkt auf dem Display ausgehen, nach der Brechung durch die Linse, parallel zueinander liegen. Die Eigenschaft, dass Lichtstrahlen, die durch den Mittelpunkt der Linse gehen, ihre Richtung nicht verändern, hilft dabei, den Punkt zu bestimmen, der auf dem Display aus einem bestimmten Blickpunkt gesehen wird.

Zuerst muss aus dem Sichtfeld die Brennweite berechnet werden (siehe Abb.5.2):

$$(5.2) f = \frac{W_{\text{Lens}}}{2 \cdot \tan\left(\frac{\text{FOV}}{2}\right)}$$

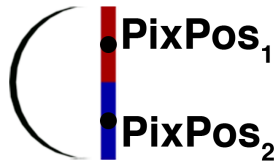
wobei  $W_{\text{Lens}}$  die Linsenbreite und FOV das Sichtfeld ist.

Daraus kann, durch die Punkt- bzw. Pixelposition unter der Linse, über den Strahlensatz, auf die Kameraposition geschlossen werden. Dazu wird zunächst die Punkt- bzw. Pixelposition benötigt (siehe Abb.5.3).

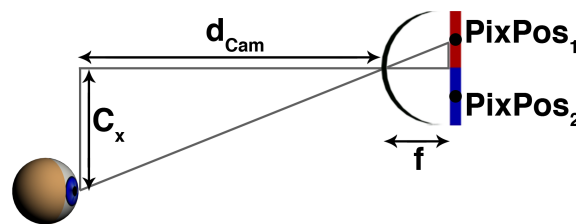
$$(5.3) \text{PixPos} = \left(x - \frac{n}{2}\right) * \frac{W_{\text{Lens}}}{n} - \frac{W_{\text{Lens}}}{2 * n}, \text{ wobei } 1 \leq x \leq n$$

$n$  ist die Anzahl von Punkt- bzw. Pixelreihen, die hinter jeder Linse zur Verfügung stehen. Die Anzahl von Ansichten und somit auch Kamerapositionen sind identisch mit  $n$ , wenn kein Oversampling stattfindet.  $x$  ist die Ansicht, die aktuell gerendert werden soll und wird mit





**Abbildung 5.3:** Zeigt die Punkt- bzw. Pixelpositionen PixPos<sub>1</sub> und PixPos<sub>1</sub> für eine Linse mit 2 ppl.



**Abbildung 5.4:** Die  $x$ -Position der Kamera  $C_x$  lässt sich aus dem Strahlensatz ableiten (siehe 5.4).

einer festen Schrittweite größer. Ohne Oversampling ist die Schrittweite 1. Mit Oversampling kann die Schrittweite z. B. 0,5 betragen, wodurch pro Punkt- bzw. Pixelreihe zwei Ansichten gerendert werden. Diese zwei müssen dann zu einer Ansicht kombiniert werden.

Um den Mittelpunkt der Reihen am Mittelpunkt der Linse auszurichten, wird von  $x$  die Hälfte des maximalen Wertes von  $x$ , was gleichbedeutend mit  $n$  ist, abgezogen. Dieser Wert wird mit der Breite einer Reihe multipliziert und zuletzt wird davon die Hälfte der Breite einer Spalte abgezogen, damit der Samplingpunkt in der Mitte der Spalte und nicht an deren Rand liegt.

Die  $x$ -Koordinate der Kameraposition  $C$  ergibt sich nun aus dem Strahlensatz (siehe Abb.5.4).

$$(5.4) \quad C_x = \frac{d_{\text{Cam}} \cdot \text{PixPos}}{f}$$

Wobei  $d_{\text{Cam}}$  den Abstand der Linse zur Ebene darstellt, in der sich die Kamera befindet. Die beiden anderen Kamerakoordinaten ergeben sich trivalerweise:

$$(5.5) \quad C_y = 0$$

$$(5.6) \quad C_z = d_{\text{Cam}}$$

Befindet sich die Mitte des Datensatzes nicht im Ursprung, kann die Kamera entsprechend bewegt werden.

Die Auflösung des Raytracing-Bildes  $\text{Res}_{\text{Raytr}}$  einer Ansicht muss der Auflösung des Displays  $\text{Res}_{\text{Display}}$  in folgender Weise entsprechen:

$$(5.7) \quad \text{Res}_{\text{Raytr}} = \frac{\text{Res}_{\text{Display}}}{n}$$

Die Reduzierung der Auflösung findet nur entlang der  $x$ -Achse des Bildes statt. Dafür wird die Schrittweite zwischen den Samples in  $x$ -Richtung um den Faktor  $n$  erhöht. Die Formel gilt nur, wenn kein Supersampling angewendet wird und keine zusätzlichen Samples entlang der  $x$ -Achse genommen werden sollen. Falls das Bild jedoch mittels einer Tiefenkarte verwischt werden soll, muss das Raytracing-Bild die volle Auflösung des Displays (oder bei Supersampling ein vielfaches davon) haben und die Schrittweite zwischen den Samples darf dann auch nicht erhöht werden, da der Filterkern für das Verwischen die Umgebung um den zu errechnenden Pixel benötigt und somit, durch Weglassen der umliegenden Samples, ein falsches Ergebnis produziert werden würde (siehe Kapitel 5.5).

Der Ursprung für den Raytracing-Strahl, der für jeden Pixel in die Szene gesendet wird, ergibt sich aus den  $x$ - und  $y$ -Koordinaten des Pixels und der Position der Kamera.

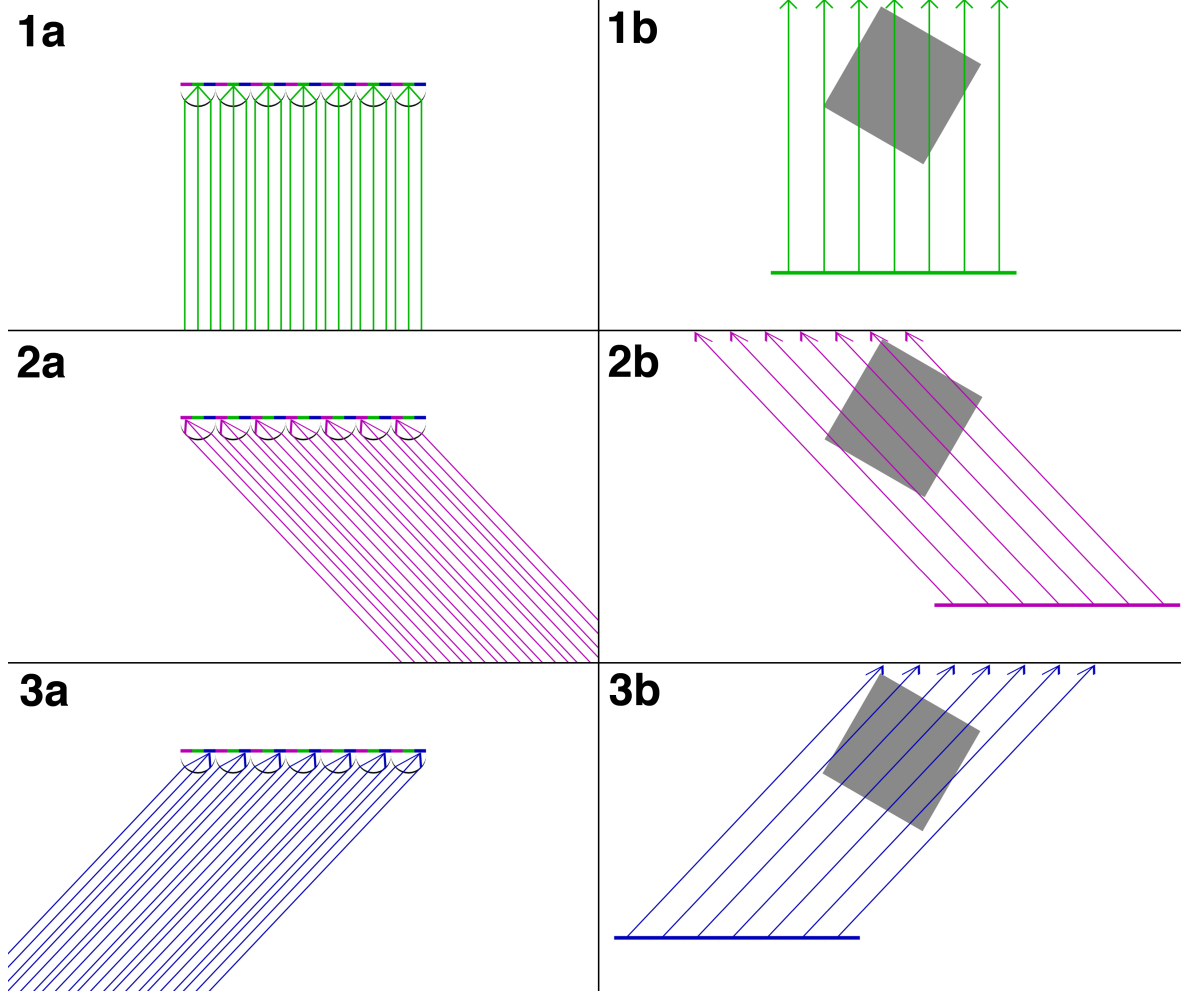
Die Richtung  $\vec{d}_{\text{ray}}$ , in die der Raytracing-Strahl geht, wird durch die aktuell zu rendernde Ansicht bestimmt. Alle Strahlen einer Ansicht sind parallel. Das bedeutet, dass die Aufnahmen mit einer abgeschrägten, orthographischen Kamera gemacht werden.

$$(5.8) \quad \vec{d}_{\text{ray}} = \begin{pmatrix} \text{PixPos} \\ 0 \\ f \end{pmatrix}$$

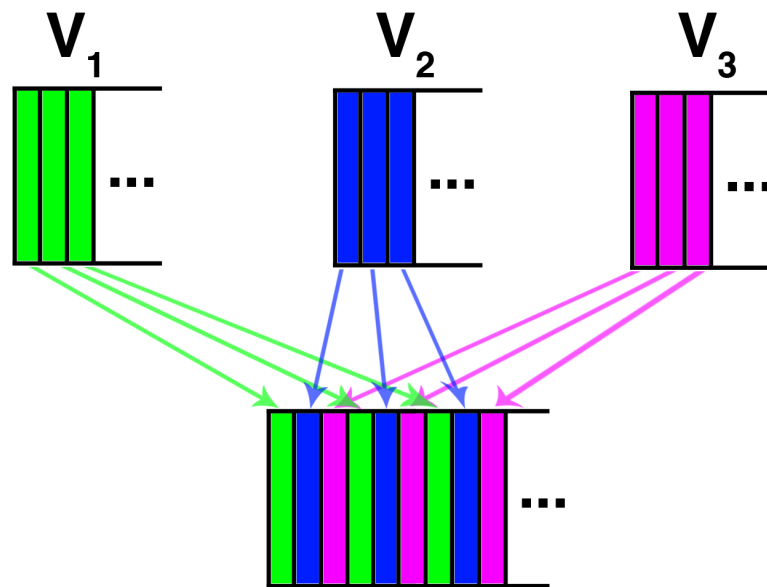
Dadurch wird der Strahlengang so erfasst, wie ihn das Linsenrasterdisplay ausgibt (siehe Abb.5.5).

In einem letzten Schritt müssen die verschiedenen Ansichten zu einem einzigen Bild zusammengefügt werden. Gibt es Oversampling-Ansichten und die Gesamtzahl aller gerenderten Ansichten ist  $r$ , dann werden für die Spalte  $x$  hinter einer Linse die Ansichten  $x \cdot \frac{r}{n}$  bis  $(x+1) \cdot \frac{r}{n} - 1$  zu einer einzigen Ansicht kombiniert. Dabei werden alle Pixel einer Ansicht mit dem Faktor  $\frac{n}{r}$  gewichtet und danach werden die Ansichten pixelweise addiert. Die genannte Vorgehensweise funktioniert allerdings nur, wenn  $r$  ein vielfaches von  $n$  ist.

Die  $n$  Ansichten werden nun spaltenweise zusammengefügt. Das bedeutet, Pixelspalte  $p$  aus Ansicht  $a$  kommt in die Pixelspalte  $p \cdot n + a$ , des endgültigen Bildes (siehe Abb.5.6 und



**Abbildung 5.5:** Ein Linsenrasterdisplay mit 3 ppL. Die linke Seite (a) zeigt jeweils den Strahlengang, den das Linsenrasterdisplay in eine bestimmte Richtung ausgibt. Die rechte Seite (b) zeigt die dazu benötigte Strahlenverfolgung beim Raytracing. Das graue Viereck stellt eine beispielhafte Szene dar, die durch das Raytracing erfasst werden kann.



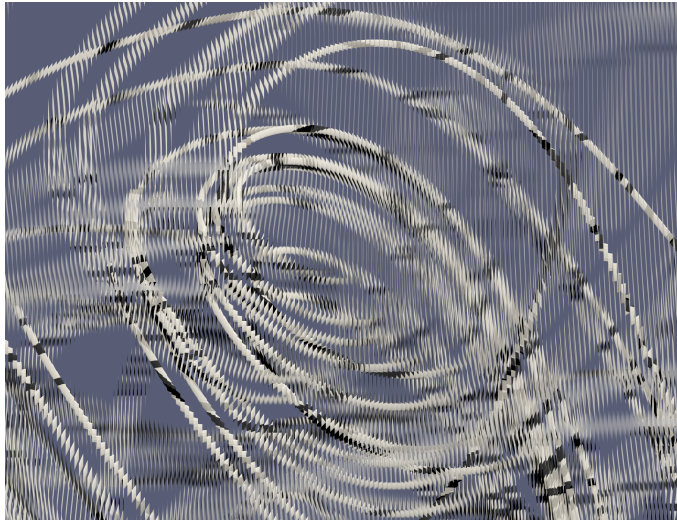
**Abbildung 5.6:** Spaltenweises Kombinieren von drei Ansichten  $V_1$ ,  $V_2$  und  $V_3$  zu einem Bild für ein Linsenrasterdisplay mit 3 ppl. Ein Ergebnis einer solchen Kombination ist in Abb.5.7 zu sehen.

Abb.5.7).

Bei Bildern mit Tiefenkarten wird die Schrittweite der Samples in x-Richtung nicht erhöht, was bedeutet, dass in allen Ansichten nur jede  $n$ -te Spalte verwendet wird. Die Pixelspalte einer Ansicht  $p \cdot n$  wird im endgültigen Bild in die Pixelspalte  $p \cdot n + a$  kopiert.

## 5.2 Bei dieser Arbeit verwendetes Linsenrasterdisplay

Bei dieser Arbeit werden die Linsenrasterdisplays durch einen Drucker der Marke „Fujifilm“ mit dem Modellnamen „3D Printer DPR-1“ verwendet [3DP]. Die Drucke werden in der Größe 6" x 9" angefertigt. Das Linsenraster hat eine Auflösung von 100 lpi. Das Bild unter dem Linsenraster hat eine Auflösung von 300 x 1200 dpi. Daraus ergeben sich rechnerisch 12 ppl. Das Bild, das dem Drucker zum Druck geschickt wird, verfügt über 10872 x 7376 Pixel. Die Linsenrasterdisplays werden von einer Druckerei hergestellt und brauchen ungefähr 5 Werktage bis sie nach der Bestellung eintreffen.



**Abbildung 5.7:** Ausschnitt aus einem fertigen Bild für das Linsenrasterdisplay. Die kombinierten Ansichten zeigen den Datensatz (siehe Abb.5.10) aus 12 verschiedenen Ansichten mit 4-fachem Oversampling und Verwischung mittels Tiefenkarte (siehe Kapitel 5.5).

### 5.3 Herkunft des Datensatzes

Der hier verwendete Datensatz stammt aus einer zeitabhängigen Auftriebssimulation, bei der unten eine heiße Platte und oben eine kalte Platte montiert werden. Dann werden die Luftbewegungen aufgezeichnet und analysiert.

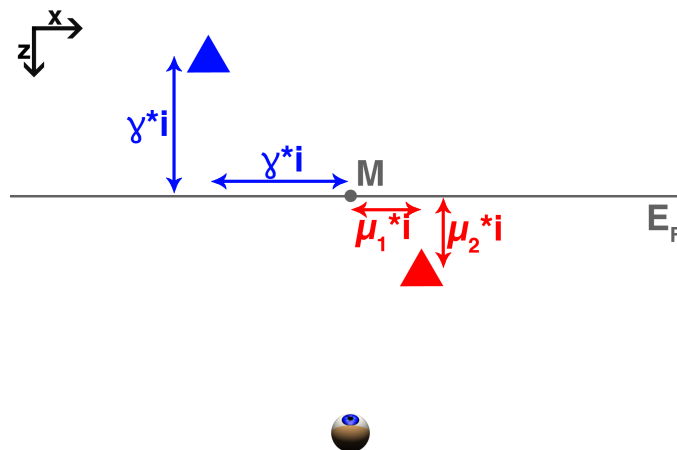
Der Datensatz wurde gewählt, da er auf den ersten Blick sehr kompliziert und unübersichtlich erscheint. Der Datensatz ist in Abb.5.10 zu sehen.

### 5.4 Ermittlung des optimalen Tiefenbereichs

#### 5.4.1 Allgemein

Zur Ermittlung des Tiefenbereichs, in dem ein spezielles Linsenrasterdisplay gut, also ohne Aliasing, darstellen kann, ist eine Testszene hilfreich. Diese Testszene sollte Elemente enthalten, die bei der späteren Betrachtung leicht Aufschluss darüber geben, ob die Tiefe, in der sich die Elemente befinden, noch gut vom Linsenrasterdisplay aufgelöst werden können. Interessant an der Tiefe ist dabei nicht die Entfernung von der Kamera, sondern die Entfernung von der Fokusebene. Die Fokusebene ist die, in der sich die Raytracing-Strahlen der selben Pixel aus verschiedenen Ansichten kreuzen.

Eine mögliche Testszene besteht aus Tetraedern, die zeilenweise, von unten nach oben, immer größeren Abstand von der Mitte des Bildes nehmen und dabei den gleichen Abstand von



**Abbildung 5.8:** Die Tetraeder werden zeilenweise neu positioniert. Diese Abbildung zeigt die Position der Tetraeder in der Zeile  $i$ .  $\gamma$  muss entsprechend der Bild- und Szenengröße gewählt werden. Wenn der zu erwartende optimale Tiefenbereich klein ist, empfiehlt sich  $\mu_{1,2} = \frac{\gamma}{2}$  zu wählen. Wird  $\mu_2$  sehr groß gewählt, kann es sein, dass der Abstand zur Mitte verkleinert werden muss, damit die Szene auf das Display passt. In diesem Fall ist  $\mu_1 \leq \mu_2$  zu wählen.

der Fokusebene haben (siehe Abb.5.8). Dadurch lässt sich der Abstand zur Fokusebene, auch bei späterer Betrachtung, leicht herausfinden.

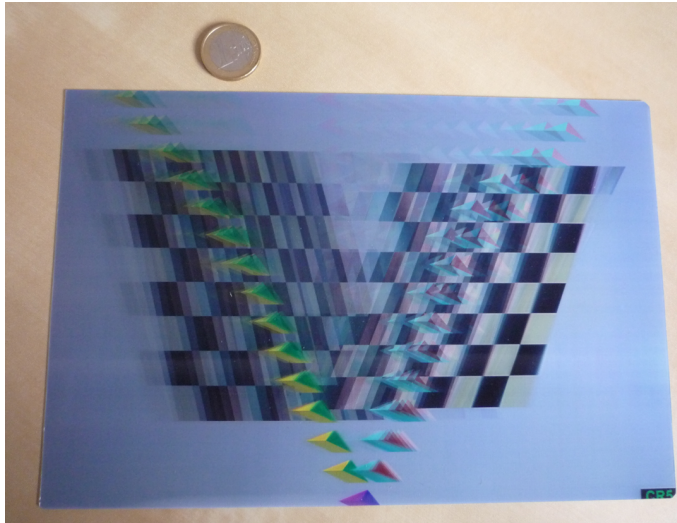
Anhand dieser Testszene lässt sich der Tiefenbereich, in dem Szenen ohne Aliasing dargestellt werden können, näherungsweise ermitteln (siehe Abb.5.9). Eine genauere Bestimmung ist ebenfalls möglich und wurde anhand des Datensatzes, der in dieser Arbeit verwendet wurde, analysiert.

#### 5.4.2 Speziell bei dieser Arbeit

Mit einem Testmuster, äquivalent zum Muster in Abb.5.1, allerdings auf die Auflösung des Druckers optimiert, ergibt sich ein Sichtfeld von  $40^\circ$ . Auch die rechnerisch bestimmten 12 ppl bestätigen sich auf diese Weise.

Das oben beschriebene Testmuster (siehe Abb.5.8) wird eingesetzt um einen ungefähren Eindruck des optimalen Tiefenbereichs zu gewinnen. Die Ergebnisse zeigen einen relativ geringen Tiefenbereich (siehe Abb.5.9). Um genauere Ergebnisse zu erzielen, wird wie folgt vorgegangen:

Die Szene mit nur 12 gerenderten Ansichten darzustellen, muss nach den Ergebnissen aus dem Tiefen-Testmuster zu schwerem Aliasing führen. Durch Oversampling, bei dieser Arbeit mit 16 gerenderten Ansichten pro mit dem Linsenrasterdisplay auflösbarer Ansicht, wird die Szene deutlich aliasing-freier, allerdings zum Großteil sehr unscharf. Der genannte Oversampling-Wert wurde dabei experimentell ermittelt und bezieht sich spezifisch auf

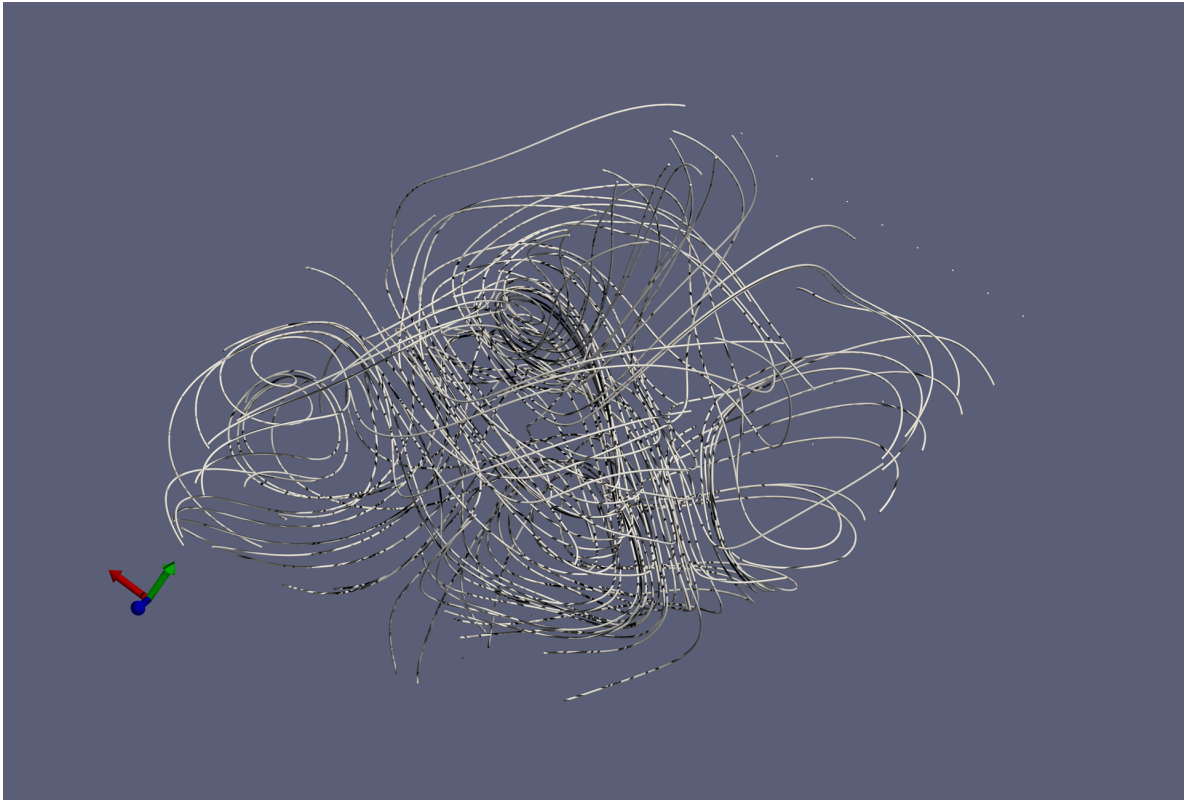


**Abbildung 5.9:** Foto des Linsenrasters mit dem Testmuster zur Kalibrierung der Tiefe. Hier ist  $\mu_1 = \frac{\gamma}{2}$  und  $\mu_2 = 2 \cdot \gamma$  gewählt (vgl. Abb.5.8). Die scharfen, aliasingfreien Tetraeder befinden sich im optimalen Tiefenbereich. (Foto wurde mit einer „Panasonic DMC-FS20“ gemacht.)

den verwendeten Datensatz (siehe Abb.5.10) in Zusammenhang mit dem verwendeten Linsenrasterdisplay.

Das wahrgenommene Bild wird danach auf die Punkte untersucht, an denen die Szene von scharfen Elementen in verschwommene übergeht. Es wird mit der Ansicht, in der die Kamera exakt so platziert wird, dass die primären Strahlen beim Raytracing orthogonal zur Fokusebene liegen, verglichen. Zusätzlich wird bei diesem Rendering eine Textur auf den Datensatz angewendet, bei welcher die Farbe in Abhängigkeit zum Abstand von der Fokusebene verändert werden kann. Dabei gilt, dass das am weitesten entfernte Element den Abstand 1 hat, so dass der Wertebereich von 0 bis 1 geht. Ab dem Abstand  $d_b$  wird der Datensatz rot eingefärbt. Der Rest erhält eine weiße Färbung.  $d_b$  wird iterativ angepasst, bis die Punkte bei denen weiß zu rot umspringt, mit den gesuchten Punkten, bei denen unscharf zu scharf wird, übereinstimmt (siehe Abb.5.11).

Dadurch kann der optimale Tiefenbereich ermittelt werden, auf den der Datensatz skaliert werden muss. Ergebnisse der Linsenrasterdisplays mit skaliertem Datensatz sind in Abb.5.13 zu sehen.



**Abbildung 5.10:** Ansicht des Datensatzes mit der Kameraposition, so dass die primären Strahlen beim Raytracing orthogonal zur Fokusebene stehen.

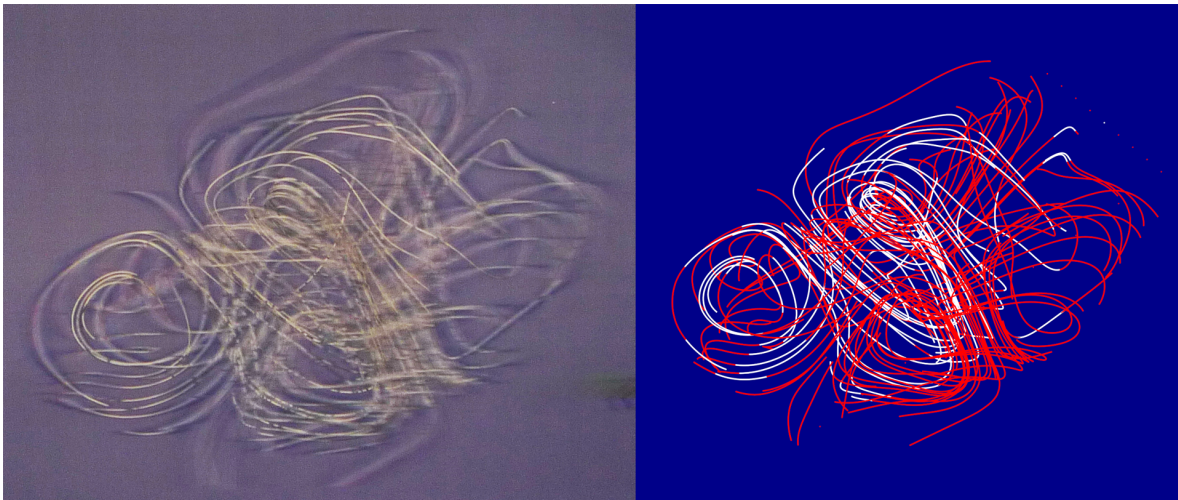
### 5.5 Verwischung mittels Tiefenkarte

Das menschliche Auge kann auf ein Objekt fokussieren, wodurch dieses scharf auf die Netzhaut abgebildet wird. Objekte, die sich weiter entfernt oder näher am Auge befinden, werden unscharf wahrgenommen (siehe Kapitel 3.2). In einem Linsenrasterdisplay, das nur drei Dimensionen wiedergeben kann, wird die Fokusebene bei der Erstellung festgelegt. Wenn das menschliche Sehen simuliert werden soll, damit die Szene natürlicher wirkt, muss diese Unschärfe in das Bild für das Linsenrasterdisplay eingearbeitet werden.

Mithilfe einer Textur, die auf die Elemente der Szene angewendet werden, können die Elemente entsprechend ihrer Entfernung von der Fokusebene, eingefärbt werden. Statt wie oben einen plötzlichen Umbruch an einem Schwellwert zu verwenden, wird ein Gradient eingesetzt. Elemente, die in der Fokusebene liegen, werden schwarz eingefärbt. Elemente, die in der Ebene mit dem maximalen Abstand von der Fokusebene liegen, werden weiß eingefärbt. Die Farben aller anderen Elemente werden durch lineare Interpolation bestimmt. Der Hintergrund ist weiß. Ein Rendering einer so eingefärbten Szene wird im Folgenden Tiefenkarte genannt.

Alle Ansichten werden normal und als Tiefenkarte gerendert. Um später korrekte Ergebnisse



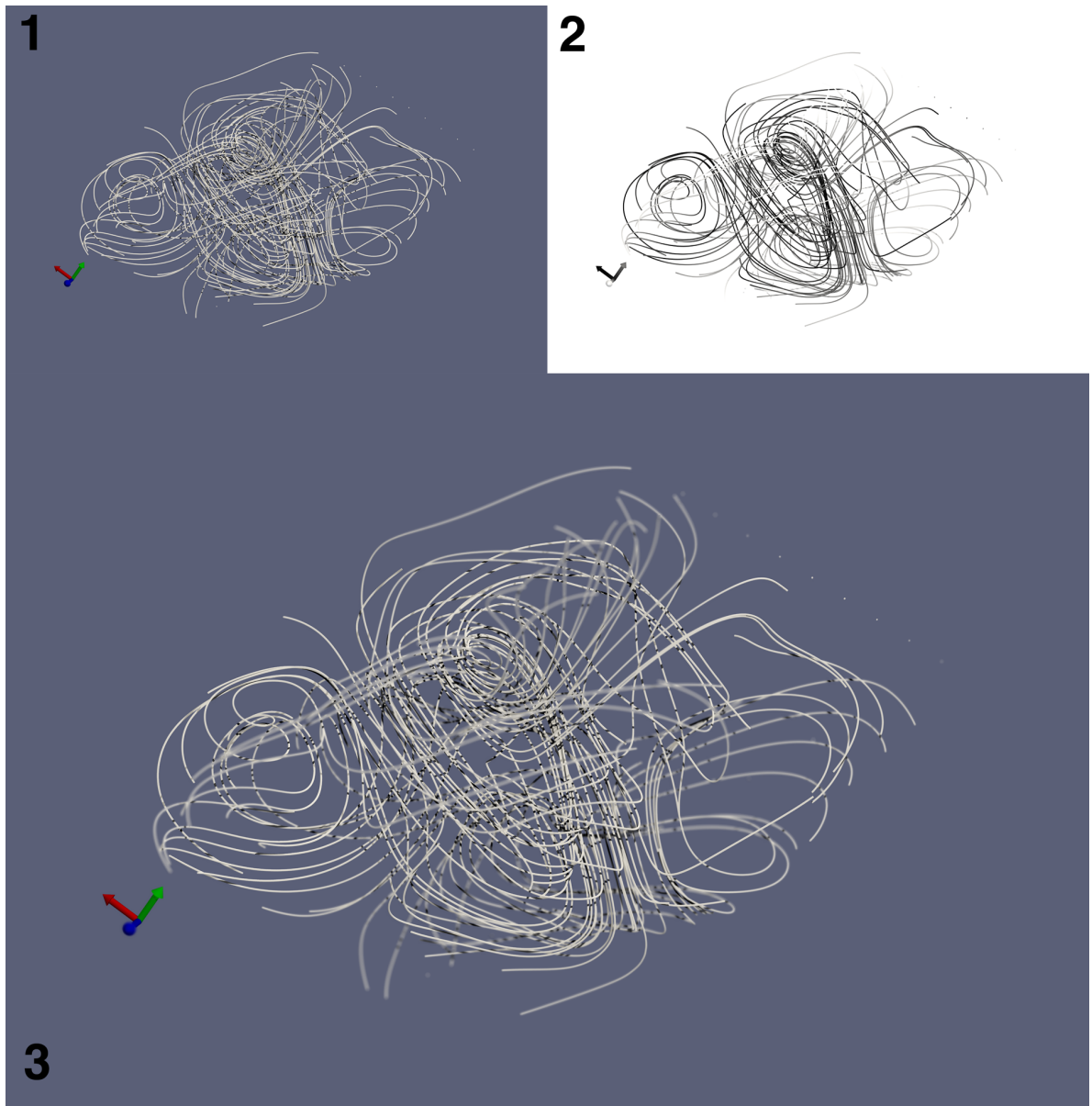


**Abbildung 5.11:** Links: Foto des Linsenrasterdisplays mit dem unskalierten Datensatz und Oversampling. Rechts: der Datensatz mit einer Textur eingefärbt, so dass alle Elemente, die weiter als der Schwellwert 0.16 von der Fokusebene entfernt sind, rot sind. Dadurch sind auf diesem Bild alle Bereiche, die auf dem linken Bild scharf bzw. nicht verwischt sind, weiß und alle unscharfen bzw. verwischten rot. (Foto wurde mit einer „Panasonic DMC-FS20“ gemacht.)

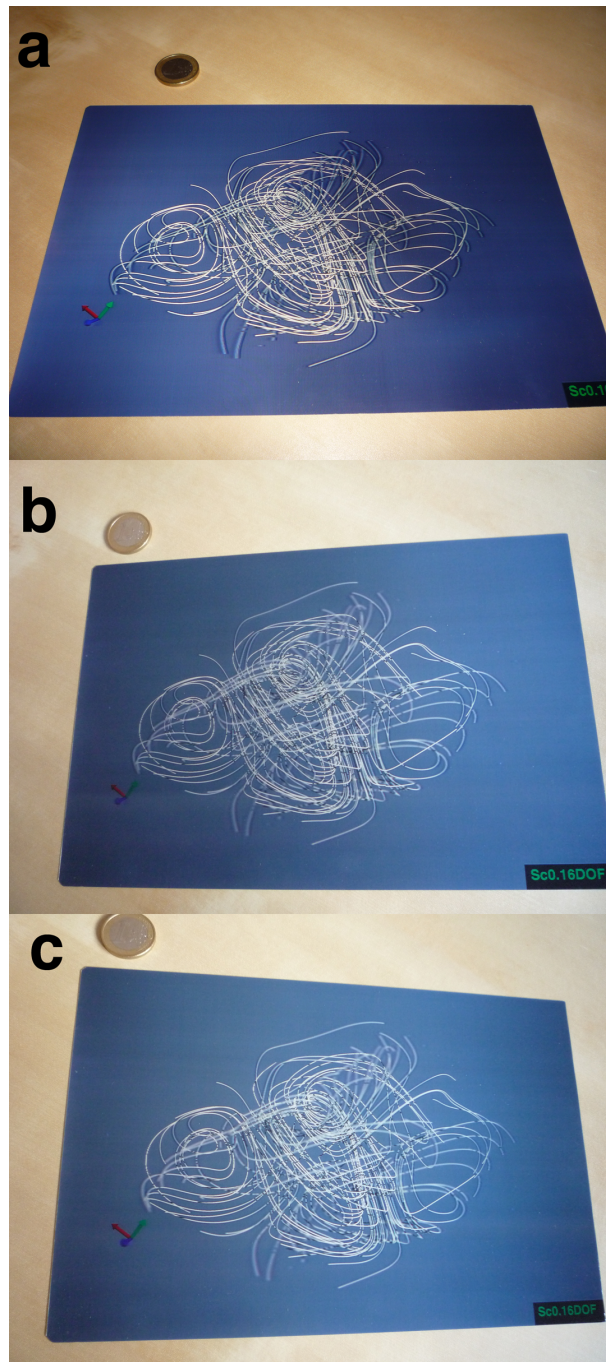
erzielen zu können, müssen alle Ansichten und Tiefenkarten die volle Auflösung des Displays haben (siehe Abb.5.12).

Die einzelnen Ansichten werden durch die Tiefenkarte verwischt. Je heller der Wert, desto mehr wird verwischt. Dadurch wird die Tiefenunschärfe des menschlichen Auges simuliert. Mathematisch bedeutet das, dass ein Filterkern zur Verwischung benutzt wird. Dieser Filterkern wird in seiner Größe adaptiert. Der Filterkern muss umso größer werden, desto heller der zugehörige Wert in der Tiefenkarte ist. Als Filterkern kann z. B. ein Gauss-Filter gewählt werden.

In dieser Arbeit wird dies in „Adobe Photoshop“ [Pho] mittels dem Filter „Tiefenschärfe abmildern...“ erreicht (Einstellungen: Iris Form: Sechseck, Iris Radius: 50, Alle anderen Regler auf 0, bis auf Spiegelartige Lichter Schwellenwert: 255) (siehe Abb.5.12). Das Programm wird unter der Annahme verwendet, dass es verlässliche und professionelle Ergebnisse liefert. Die Parameter werden so eingestellt, dass die Schärfentiefe subjektiv möglichst realistisch wirkt. Da die Ansichten die volle Auflösung haben, darf beim Kombinieren zum endgültigen Bild für das Linsenrasterdisplay nicht jede Pixelspalte, sondern nur jede  $n$ -te Pixelspalte bei  $n$  ppl verwendet werden. Ergebnisse sind in Abb.5.13 zu sehen.



**Abbildung 5.12:** Bild 1 ist ein normales Rendering der Szene. Bild 2 ist die Tiefenkarte von Bild 1. Bild 3 ist das Bild, nachdem die Tiefenschärfe von Bild 1, mittels den Werten aus der Tiefenkarte, reduziert wurde (Programm: „Adobe Photoshop“ [Pho], Filter: „Tiefenschärfe abmildern...“).



**Abbildung 5.13:** Fotos von Linsenrasterdisplays. a) Erstellt mit 16-fachem Oversampling und Skalierung des Datensatzes auf den optimalen Tiefenbereich. b) Erstellt mit 4-fachem Oversampling und Verwischung mittels Tiefenkarte. Die Szene ist ebenfalls auf den optimalen Tiefenbereich skaliert. c) Foto vom gleichen Linsenrasterdisplay wie in b), aber aus einer anderen Ansicht fotografiert. (Fotos wurden mit einer „Panasonic DMC-FS20“ gemacht.)

### 5.6 Vorgehensweise bei dieser Arbeit

Zunächst wird das Linsenrasterdisplay mit dem beschriebenen Muster kalibriert (siehe Kapitel 5.1). Danach wird der optimale Tiefenbereich mit Hilfe der Technik aus Kapitel 5.4.1 ungefähr ermittelt. Das Ergebnis zeigt einen relativ geringen Tiefenbereich (siehe Abb.5.9). Daher wird zuerst versucht das Aliasing zu reduzieren, indem Oversampling eingesetzt wird. Der lange Zeitraum zwischen Bestellung und Lieferung eines Linsenrasterdisplays hat zur Folge, dass das Oversampling nicht langsam iterativ erhöht wird, sondern der Datensatz direkt mit 8-fachem Oversampling eingesendet wird. Allgemein werden dadurch Berechnungen der experimentellen, iterativen Vorgehensweise bevorzugt.

Aus dem Linsenrasterdisplay mit 8-fachem Oversampling wird ersichtlich, dass das Oversampling noch einmal erhöht werden sollte und dass durch das Oversampling zwar das Aliasing abnimmt, aber viele Bereiche stark unscharf sind. Im nächsten Linsenrasterdisplay wird versucht die Unschärfe zu reduzieren, in dem ein kleineres Sichtfeld auf das tatsächliche Sichtfeld des Linsenrasterdisplays abgebildet wird. Dazu wird die Szene mit 16-fachem Oversampling einmal mit dem tatsächlichen Sichtfeld von  $40^\circ$  und einmal mit halbiertem Sichtfeld erstellt.

Mit der selben Technik wie in Kapitel 5.4.2 wird ermittelt wie stark der optimale Tiefenbereich größer geworden ist. Daraus ergibt sich, dass entsprechend der Formel 5.4, das Sichtfeld auf ungefähr  $2.5^\circ$  reduziert werden müsste, damit die Szene komplett im optimalen Tiefenbereich liegt. Gleichzeitig wird ermittelt, wie groß der optimale Tiefenbereich im Linsenrasterdisplay mit dem tatsächlichen Sichtfeld ist (siehe Kapitel 5.4.2). Das Ergebnis ist, dass der Datensatz auf 16 Prozent seiner Größe entlang der Orthogonalen der Fokusebene gestaucht werden müsste. Das bedeutet, dass der 3D-Effekt sowohl bei der Stauchung als bei einem reduzierten Sichtfeld um das selbe Maß abnimmt. Da bei einer Stauchung das tatsächliche Sichtfeld verwendet werden kann und die Disparität nicht reduziert wird, sollte sich die Szene durch eine Drehbewegung des Linsenrasterdisplays nach Rechts oder Links natürlich mitdrehen, solange der Betrachter innerhalb des Sichtfeldes der Linsen ist. Darum wird im Folgenden die Stauchung der Szene der Abbildung eines verringerten Sichtfeldes auf das tatsächliche Sichtfeld vorgezogen.

Der auf den optimalen Tiefenbereich skalierten Datensatz wird zusammen mit einer zweiten Version, bei der noch die Verwischung mittels Tiefenkarte (siehe Kapitel 5.5) angewandt wird, an die Druckerei geschickt. Dabei wird in der zweiten Version nur 4-faches Oversampling verwendet, da durch die Verwischung bereits das Aliasing reduziert wird. Der Wert von 4-fachem Oversampling wird dabei durch einfaches Schätzen gewählt.

## 6 Evaluation der Linsenrasterbilder

### 6.1 Hypothese und Durchführung

In einer Pilotstudie soll festgestellt werden, ob die Linsenrasterdisplays gegenüber normalen 2D-Bildern und 3D-Anaglyphenbildern Vorteile bieten. Dazu wird den Probanden die Aufgabe gestellt eine Linie im Bild zu verfolgen. Ihnen werden in zufälliger Reihenfolge 3 verschieden Bilder vorgelegt. Bild I ist die Szene auf einem Linsenrasterdisplay (siehe Abb.5.13b und c). Bild II ist ein 2D-Ausdruck der Szene (siehe Abb.6.1a). Bild III ist ein Anaglyphenbild der Szene (siehe Abb.6.1b), zu dem die Probanden eine entsprechende Anaglyphenbrille erhalten. Das Anaglyphenbild und das 2D-Bild zeigen den unskalierten Datensatz, da bei diesen Verfahren keine Stauchung nötig ist. Beide wurden an einem „Kodak Picture Kiosk G4x Digital Station“ in einer Größe von 15 x 20 cm mit einer Auflösung von 300 dpi gedruckt [Kod].

Der Proband sieht zu jeder Zeit nur eines der Bilder. Auf jedem Bild soll eine Linie verfolgt werden (siehe Abb. 6.2). Während die Reihenfolge, der Linien die verfolgt werden sollen, bei jedem Probanden die Gleiche ist, wird durch den Wechsel der Reihenfolge der Bilder ermittelt, auf welchem Bild die Linien am einfachsten verfolgt werden können.

Die Zeit die ein Proband zum Verfolgen einer Linie braucht, wird aufgenommen. Der Proband wird zuvor darauf aufmerksam gemacht, dass es wichtig ist, die Linie richtig zu verfolgen und die Zeit keine wichtige Rolle spielt.

Den Probanden wird die Frage gestellt, ob sie eine Brille besitzen und falls dies der Fall ist,

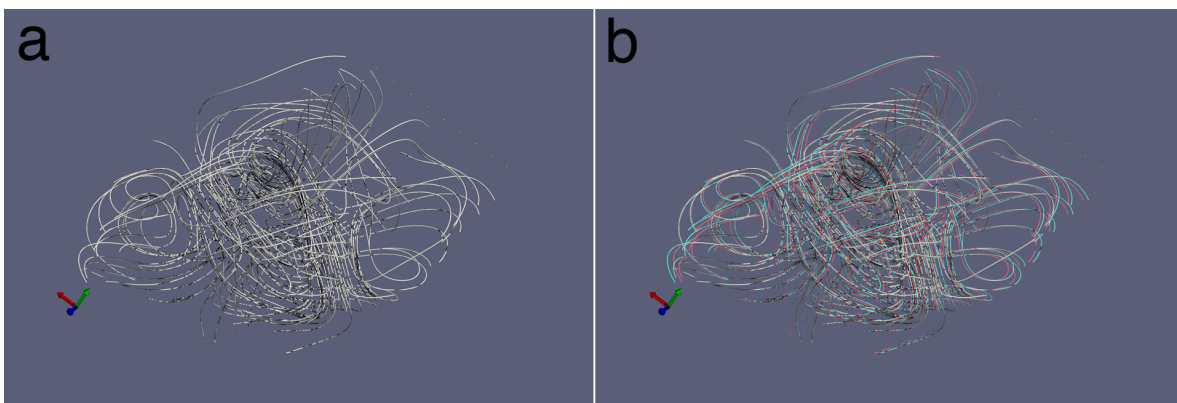
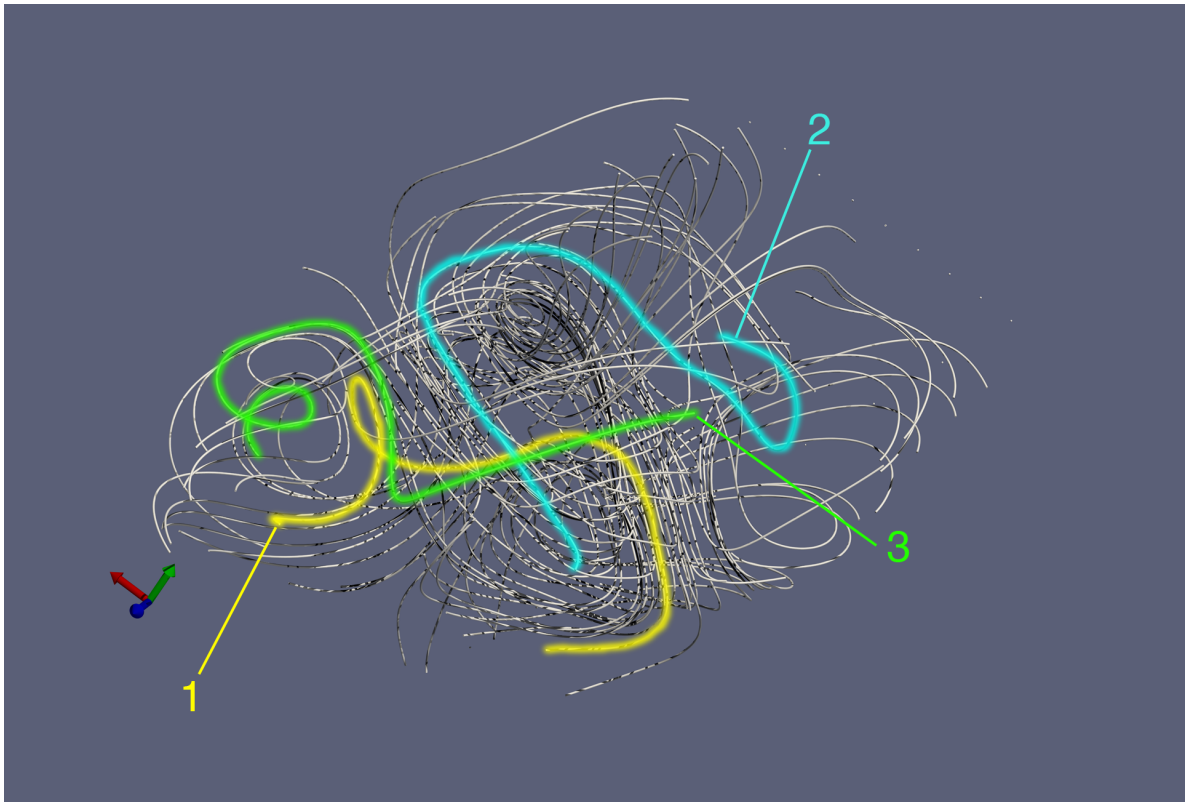


Abbildung 6.1: a) ein 2D-Bild der Szene. b) ein Anaglyphenbild der Szene.



**Abbildung 6.2:** Die Aufgabe der Probanden ist die Linien zu verfolgen. Im ersten Bild, das ihnen vorgelegt wird, sollen sie die erste Linie verfolgen. Im zweiten, die zweite. Im dritten, die dritte. Der jeweilige Linienanfang wird durch die farbigen Nummern angezeigt.

werden sie dazu aufgefordert sie aufzusetzen.

In dieser Studie werden 9 Probanden befragt. Die Probanden sind zwischen 20 und 52 Jahre alt. 5 von ihnen sind weiblich und 4 männlich. Ein Proband wird aus der Auswertung ausgeschlossen, weil er während der Studie Augenprobleme empfand.

### 6.2 Ergebnisse

Die Messergebnisse der Studie sind in Tabelle 6.1 zu sehen.

Anhand des Prozentsatzes, der die Linie in einem Bild richtig erkannt hat, werden die verschiedenen Visualisierungsarten verglichen (siehe Abb.6.3).

Die Auswertung ergibt, dass im Linsenrasterdisplay die Linien mindestens so gut wie im 2D-Bild verfolgbar sind und etwas schlechter als im Anaglyphenbild.

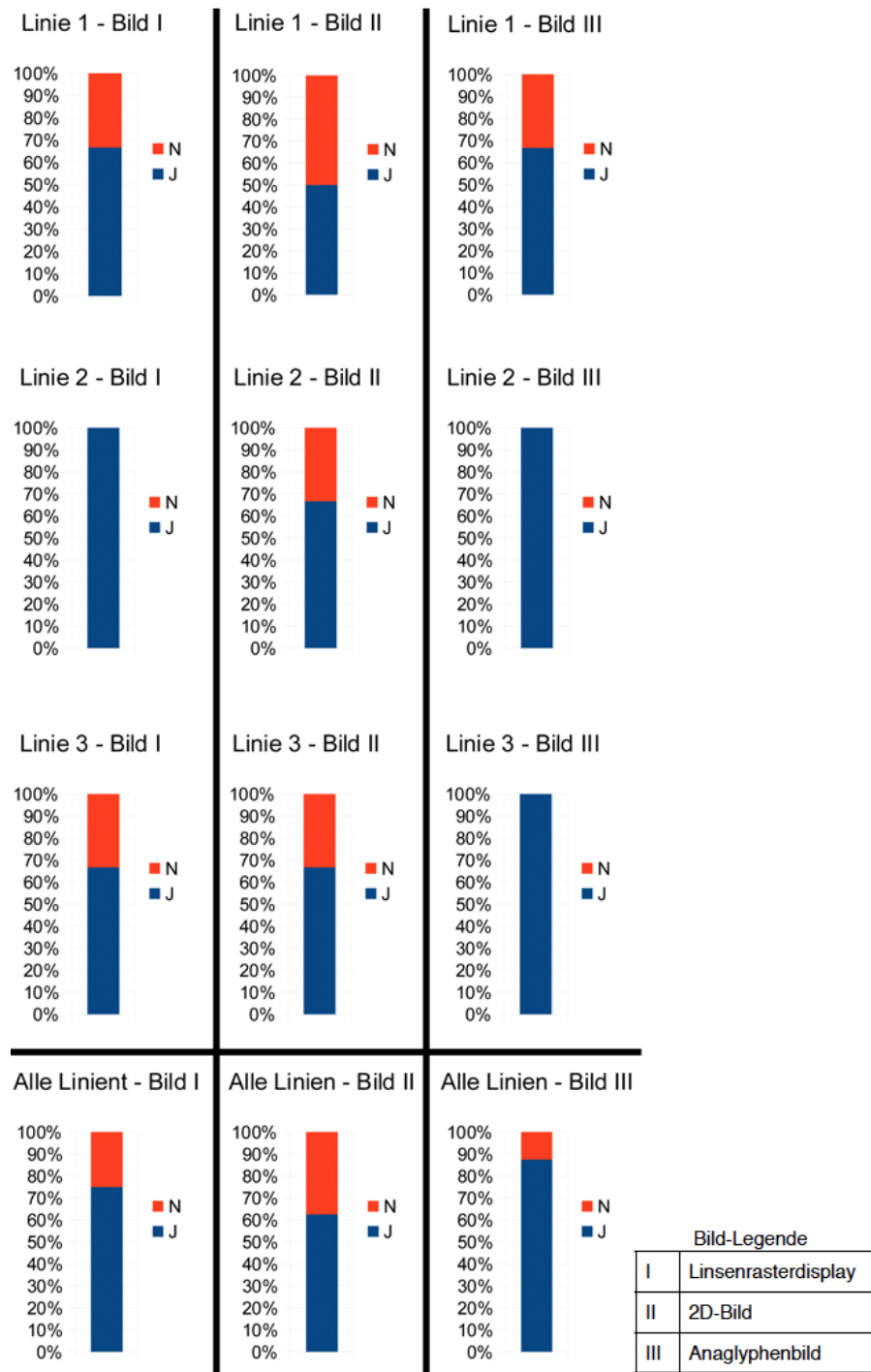
Testperson	Linie	Bild	Linie richtig verfolgt?	Zeit (m:ss)
1	1	II	N	0:26
	2	I	J	0:15
	3	III	J	0:34
2	1	II	J	0:40
	2	III	J	0:56
	3	I	N	0:25
3	1	III	J	0:10
	2	II	N	0:09
	3	I	J	0:10
4	1	I	J	0:17
	2	III	J	0:18
	3	II	J	0:36
5	1	I	N	0:13
	2	II	J	0:24
	3	III	J	0:25
6 Augen- probleme	1	I	N	0:50
	2	II	N	0:36
	3	III	N	0:18
7	1	I	J	0:45
	2	III	J	0:09
	3	II	J	0:45
8	1	III	J	0:49
	2	I	J	1:06
	3	II	N	0:33
9	1	III	N	0:18
	2	II	J	0:15
	3	I	J	0:11

Bild-Legende	
I	Linsenrasterdisplay
II	2D-Bild
III	Anaglyphenbild

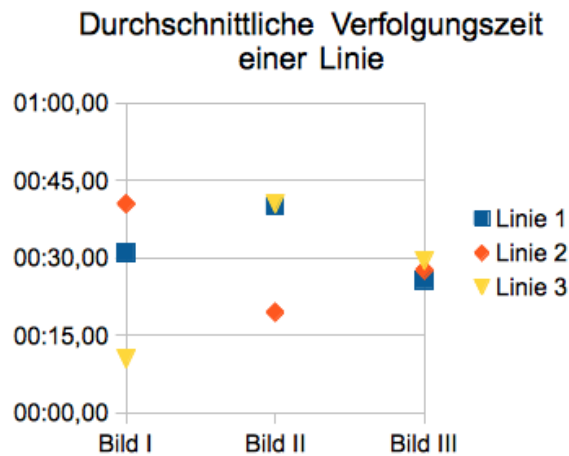
**Tabelle 6.1:** Die Messergebnisse der Studie. Die grau hinterlegten Messungen werden nicht in die Auswertung einbezogen. Die orange hinterlegten Werte sind vermutliche Ausreißer.

## 6 Evaluation der Linsenrasterbilder



**Abbildung 6.3:** Die Diagramme zeigen wie viel Prozent der Probanden, die die jeweilige Aufgabe gestellt bekommen haben (z. B. Linie 1 in Bild I verfolgen), die Linie richtig verfolgen konnten. J: Linie konnte verfolgt werden. N: Linie konnte nicht verfolgt werden.





**Abbildung 6.4:** Dieses Diagramm zeigt, wie lange die Verfolgung einer bestimmten Linie auf einem bestimmten Bild im Durchschnitt gebraucht hat. Gewertet wurden nur Zeiten, bei denen die Probanden die Linie richtig verfolgt hatten.

Die Linsenrasterdisplays bringen, im Vergleich zum einfachen 2D-Bild, einen Vorteil. Linien werden öfter richtig verfolgt. Die dafür benötigte Zeit (siehe Abb.6.4), lässt eine abnehmende Tendenz erkennen, wenn man davon ausgeht, dass es sich bei der Messung von Proband 8, Linie 2 um einen Ausreißer handelt. Diese Vermutung liegt Nahe, da alle anderen Messwerte niedriger, meistens sogar deutlich niedriger sind.

Bis auf einen weiteren, vermutlichen Ausreißer bei der Zeitmessung von Proband 2, Linie 2 ist zu beobachten, dass die Linienverfolgung auch beim Anaglyphenbild schneller geht als bei einem 2D-Bild.

Die Farbanaglyphentechnik hat, zumindest in dieser Pilotstudie, gegenüber den verwendeten Linsenrasterdisplays ein leicht besseres Ergebnis. Dies kann entweder an der wenigen Probanden dieser Studie liegen, oder aber daran, dass bei diesem Bild die Szene nicht gestaucht wurde.

Die Verbesserung des Verständnisses des Datensatzes durch ein Linsenrasterdisplay oder Anaglyphenbild gegenüber einem 2D-Bild lässt sich dagegen bestätigen. Die häufiger richtig verfolgten Linien in Verbindung mit den allgemein kürzeren Verfolgungszeiten machen das deutlich.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Visualisierung von Datensätzen auf Linsenrasterdisplays und dem Vergleich von herkömmlichen 2D-Bildern mit ihnen.

Um Szenen korrekt auf dem Linsenrasterdisplay ausgeben zu können, muss es kalibriert werden. Dazu wird ein Kalibrierungsmuster vorgestellt mit dem das möglich ist. Es wird beschrieben, wie eine Szene aufgenommen werden muss und welche Techniken eingesetzt werden können um das Aliasing zu reduzieren. Die Schwierigkeit hierbei ist, den optimalen Tiefenbereich zu bestimmen. Es wird eine Technik vorgestellt, wie das im allgemeinen Fall ungefähr erreicht wird und eine, wie das speziell anhand des verwendeten Datensatzes genauer bestimmt wird. Die Szene kann dadurch auf die Größe des ermittelten Tiefenbereichs gestaucht werden. Die Verwendung von Tiefenkarten zur Simulation der Schärfentiefe des menschlichen Auges trägt dazu bei die Szene etwas natürlicher wirken zu lassen.

Die fertigen Linsenrasterdisplays werden verwendet, um zwischen herkömmlichen 2D-Bildern der Szene und den Linsenrasterdisplays vergleichen zu können. Die Linsenrasterdisplays werden auch der Farbanaglyphentechnik gegenübergestellt.

In einer Pilotstudie wird ermittelt, dass die Verwendung von Linsenrasterdisplays eine Verbesserung der Wahrnehmung der Szene mit sich bringt. Die Farbanaglyphentechnik vermittelt den Inhalt dagegen noch leicht besser.

### Ausblick

Die Vorteile eines Linsenrasterdisplays gegenüber 2D-Bildern werden in der Pilotstudie ersichtlich. Die Farbanaglyphentechnik erzielt, zumindest bei der Pilotstudie, bessere Ergebnisse. Bei dieser Technik muss, im Gegensatz zu Linsenrasterdisplays, allerdings eine Brille getragen werden.

Eine Studie mit vielen Probanden und eventuell mehreren Szenen bzw. Datensätzen könnte ein genaueres Ergebnis liefern. Das verwendete Linsenrasterdisplay hat 12 Ansichten und sollte erwartungsgemäß deutlich mehr Informationen transportieren können, als ein Anaglyphenbild mit 2 Ansichten. Daher wäre es interessant zu ermitteln, ob das Ergebnis der Pilotstudie durch statistische Probleme zustande kommt oder durch die reduzierte Tiefe der Szene beim Linsenrasterdisplay.

Sollte letzteres der Fall sein, könnten die leichten Defizite der Linsenrasterdisplays gegenüber den Anaglyphenbildern, durch eine Anhebung der ppi ohne Reduktion der lpi, reduziert oder sogar gänzlich aufgehoben werden.

Kumar et al. haben ein Verfahren vorgestellt, das es möglich macht, mit circa 100.000 dpi zu drucken [KDH<sup>+</sup> 12]. Mit einer derart feinen Auflösung sollte es möglich sein, ein Linsenraster,

sogar eines, dass ein 4D-Lichtfeld ausgibt, mit so kleinen Linsen zu verwenden, dass sie für das menschliche Auge nicht mehr zu erkennen sind und gleichzeitig eine hohe ppl-Zahl zu erreichen, dass kein Aliasing mehr auftritt, ohne dabei die Tiefe der Szene zu beschränken. Auch das Sichtfeld der Linsen könnte dabei groß gehalten werden. Die Schwierigkeit würde dann nicht mehr beim Aliasing liegen, sondern darin, die vielen Ansichten zu erzeugen. Mit einem solchen autostereoskopischen Display sollte es möglich sein, die Szene sehr realistisch in 3D darzustellen und deren Inhalt sehr gut zu vermitteln.

## Literaturverzeichnis

- [3DP] Fujifilm 3D Printer DPR-1. URL [http://www.fujifilm.com/products/photofinishing/3d\\_print\\_system/dpr1/](http://www.fujifilm.com/products/photofinishing/3d_print_system/dpr1/). (Zitiert auf Seite 36)
- [AH93] S. Adelson, L. Hodges. Stereoscopic ray-tracing. *The Visual Computer*, 10:127–144, 1993. doi:10.1007/BF01900903. URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF01900903>. (Zitiert auf Seite 12)
- [AJM<sup>+</sup>11] M. Andersson, B. Johnsson, J. Munkberg, P. Clarberg, J. Hasselgren, T. Akenine-Möller. Efficient multi-view ray tracing using edge detection and shader reuse. *The Visual Computer*, 27:665–676, 2011. doi:10.1007/s00371-011-0560-4. URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00371-011-0560-4>. (Zitiert auf Seite 12)
- [Cem] Cem. 3D-Hype schon bald wieder vorbei? URL <http://www.blogbusters.ch/sidekicks/3d-hype-schon-bald-wieder-vorbei/>. (Zitiert auf den Seiten 9 und 22)
- [Gab49] D. Gabor. Microscopy by Reconstructed Wave-Fronts. *Royal Society of London Proceedings Series A*, 197:454–487, 1949. doi:10.1098/rspa.1949.0075. URL <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1949.0075>. (Zitiert auf Seite 23)
- [GGSC96] S. J. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, M. F. Cohen. The lumigraph. In *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH '96*, S. 43–54. ACM, New York, NY, USA, 1996. doi:10.1145/237170.237200. URL <http://doi.acm.org/10.1145/237170.237200>. (Zitiert auf den Seiten 11 und 18)
- [Haf94] H. Haferkorn. *Optik : physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen*. Barth Verlagsgesellschaft mbH, 1994. (Zitiert auf den Seiten 13, 14, 15 und 18)
- [HJW<sup>+</sup>08] T. Hachisuka, W. Jarosz, R. P. Weistroffer, K. Dale, G. Humphreys, M. Zwicker, H. W. Jensen. Multidimensional adaptive sampling and reconstruction for ray tracing. *ACM Trans. Graph.*, 27(3):33:1–33:10, 2008. doi:10.1145/1360612.1360632. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1360612.1360632>. (Zitiert auf Seite 12)
- [KDH<sup>+</sup>12] K. Kumar, H. Duan, R. S. Hegde, S. C. W. Koh, J. N. Wei, J. K. W. Yang. Printing colour at the optical diffraction limit. *Nat Nano*, 2012. doi:10.1038/nnano.2012.128. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nnano.2012.128>. (Zitiert auf Seite 51)
- [Kod] Kodak Picture Kiosk G4x Digital Station. URL [http://www.tetenal.de/index\\_c.htm?AKT=01020030001200000000&L=DE](http://www.tetenal.de/index_c.htm?AKT=01020030001200000000&L=DE). (Zitiert auf Seite 45)

- [LH96] M. Levoy, P. Hanrahan. Light field rendering. In *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, SIGGRAPH '96*, S. 31–42. ACM, New York, NY, USA, 1996. doi:10.1145/237170.237199. URL <http://doi.acm.org/10.1145/237170.237199>. (Zitiert auf den Seiten 11, 18 und 19)
- [Lip08a] G. Lippmann. Épreuves réversibles donnant la sensation du relief. *Journal de Physique*, 7(1):821–825, 1908. doi:10.1051/jphystap:019080070082100. URL <http://dx.doi.org/10.1051/jphystap:019080070082100>. (Zitiert auf Seite 11)
- [Lip08b] G. Lippmann. Épreuves réversibles. Photographies intégrales. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 146:446–451, 1908. (Zitiert auf Seite 11)
- [MT05] C. N. Moller, A. R. Travis. Correcting Interperspective Aliasing in Autostereoscopic Displays. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 11:228–236, 2005. doi:10.1109/TVCG.2005.28. URL <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/TVCG.2005.28>. (Zitiert auf Seite 11)
- [Pho] Adobe Photoshop. URL <http://www.adobe.com/de/products/photoshop.html>. (Zitiert auf den Seiten 41 und 42)
- [POV] POV-Ray. URL <http://www.povray.org>. (Zitiert auf den Seiten 21 und 32)
- [Rei] S. Reinke. Kleine Schnitte, großes Kino. URL <http://www.hildesheimer-allgemeine.de/chirurgie.html>. (Zitiert auf Seite 9)
- [SCG<sup>+</sup>05] P. Sen, B. Chen, G. Garg, S. R. Marschner, M. Horowitz, M. Levoy, H. P. A. Lensch. Dual photography. *ACM Trans. Graph.*, 24(3):745–755, 2005. doi:10.1145/1073204.1073257. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1073204.1073257>. (Zitiert auf Seite 13)
- [TKH09] M. Tsuboi, S. Kimura, T. Horikoshi. An objective and subjective evaluation of an autostereoscopic 3d display. In *Proceedings of the 27th international conference extended abstracts on Human factors in computing systems, CHI EA '09*, S. 3577–3582. ACM, New York, NY, USA, 2009. doi:10.1145/1520340.1520537. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1520340.1520537>. (Zitiert auf Seite 12)
- [Zau] H. Zaun. Modernste Holographie-Technik revolutioniert Archäologie. URL <http://www.wissenschaft.de/wissenschaft/hintergrund/172926.html>. (Zitiert auf Seite 9)
- [ZMD<sup>+</sup>06] M. Zwicker, W. Matusik, F. Durand, H. Pfister, C. Forlines. Antialiasing for automultiscopic 3D displays. In *ACM SIGGRAPH 2006 Sketches, SIGGRAPH '06*. ACM, New York, NY, USA, 2006. doi:10.1145/1179849.1179983. URL <http://doi.acm.org/10.1145/1179849.1179983>. (Zitiert auf Seite 11)

Alle URLs wurden zuletzt am 23.09.2012 geprüft.

## **Erklärung**

Hiermit versichere ich, diese Arbeit selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen benutzt zu haben.

---

(David Richard Schäfer)