

Charakterisierung und Demonstration von Grenzkonflikten bei der Perzeption von Stereo-3D Inhalten hinsichtlich der patenten und okulomotorischen Stereopsis in VR-Anwendungen

Ann-Sophie Dietrich, Robert Döhler, Kathrin Fuhrer,
Lukas Scheuerle, Adrian Vögtle, Philipp Winskowski

Betreut von: Prof. Nikolaus Hottong

Fakultät Digitale Medien, Hochschule Furtwangen University, Robert-Gerwig-Platz 1, 78120 Furtwangen
09 Februar 2018

Abstract

Okulomotorische und patente Stereopsis sind wesentliche Aspekte, die dem Menschen nicht nur im realen Leben, sondern auch in einer VR-Umgebung das dreidimensionale Sehen ermöglichen. Aufgrund gewisser Eigenschaften von VR-Umgebungen, können diese Aspekte bei unbedachter Konzeption der Anwendung, zu Problemen in der Wahrnehmung führen. In verschiedenen Experimenten wurde die Toleranzschwelle solcher Konfliktzonen untersucht, in denen sich die Betrachter noch wohl fühlen können. Insbesondere bei der technischen Umsetzung von 3D-Inhalten gibt es Unterschiede in den Werten zum realen Sehen.

In Bezug auf die Erkenntnisse von Shibata, Kim, Hoffman und Banks in der Veröffentlichung *The Zone of Comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays* wird in dieser Arbeit Regeln abgeleitet, die den Entwicklern bei der Erstellung von Virtual-Reality-Inhalten helfen sollen, eine Anwendung zu erschaffen, die den Betrachter nicht in Grenzkonflikte mit der patenten oder okulomotorischen Stereopsis bringt. Dazu wurde eine VR-Anwendung entwickelt, die den Betrachter an genau diese Grenzen bringen soll. Mit dieser Applikation wurden Probandentests durchgeführt, mit deren Resultaten die oben genannten Regeln hergeleitet werden sollen.

Oculomotor and patent stereopsis are essential aspects that allow humans to see three dimensional, in real life and virtual reality. Because of certain properties in VR-Environments these aspects might lead to problems in spatial perception. In distinct experiments the size of the areas in which the viewer feels comfortable with was examined for the case of natural vision. The size of these areas changes with technically generated content.

In this work a rule is derived which refers to the findings of Shibata in the publication "The Zone of Comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays". This rule can be used when creating three dimensional applications for virtual reality and should avoid leaving the comfort zone. Against this background, a virtual reality application was developed which should bring the viewer into oculomotor and patent stereopsis border conflicts. Based on the results of the subject test with this application, the rule could be derived.

Keywords: Stereoskopie, Stereopsis, Virtual Reality, HTC Vive, S3D

Einleitung

Die Technik und ihr unaufhaltbarer Fortschritt bringt nicht nur viele Neuerungen mit sich, sondern bringt auch viele unvorhersehbare Herausforderungen mit sich. So muss sich auch im Themenfeld der virtuellen Realität mit ungeahnten Problemen auseinander gesetzt werden. Durch die Verwendung einer VR-Brille wird der Nutzer in eine virtuelle Umgebung gebracht, die für ihn und für seine Augen ungewohnt ist und zugleich oft unnatürlich erscheint. Befindet sich der Nutzer in einer solchen unnatürlichen Situation, so ist es möglich, dass dabei biologisch bedingte Grenzkonflikte auftreten, die den Komfort und damit die Nutzbarkeit einer VR-Anwendung stark beeinträchtigt.

Die Idee dieser Arbeit ist es, eine VR-Anwendung zu erstellen, die genau diese Grenzkonflikte erzwingt, um daraus eine Regel zur Erstellung von S3D-VR-Anwendungen abzuleiten. Mit Hilfe dieser Regeln sollen diese Konflikte vermieden werden. Die patente und die okulomotorische Stereopsis stellen dafür die elementare Basis dar, denn sie sind hauptverantwortlich für die binokulare Raumwahrnehmung und tragen somit einen Großteil zum räumlichen Sehen bei.

Eine Reihe von empirischen Tests in der VR-Umgebung soll die Belastbarkeit sowie die Unbehaglichkeitsschwelle der Probanden in Bezug auf die Stereoskopie auf die Probe stellen. Mit den daraus resultierenden Erkenntnissen wird eine Regel aufgestellt, die zur Vermeidung von Grenzkonflikten der patenten und okulomotorischen Stereopsis in VR-Anwendungen beiträgt.

Diese Arbeit befasst sich ausschließlich mit den oben erwähnten biologischen Aspekten der ausgelösten Unbehaglichkeiten, nicht aber mit anderen Ursachen für ein Unwohlsein in

VR-Umgebungen, wie zum Beispiel der Visually-Induced-Motion-Sickness (VIMS).

Grundlagen

3D-Sehen

Die Effekte von patenter und okulomotorischer Stereopsis sind abhängig von absoluter und relativer Parallaxe. Parallaxen werden in einer festgelegten Längeneinheit gemessen, für das hier beschriebene Szenario in Pixel. Ausschlaggebend ist in diesem Fall die Auflösung der beiden Displays der VR-Brille. Die kleinste messbare Parallaxe hat eine Größe von einem Pixel.

Die absolute Parallaxe ist der horizontale Pixelabstand von dem linken und rechten Abbild eines identischen Objektes. Ist der numerische Wert dieser Parallaxe größer Null, so wird das Objekt hinter der Display-Ebene wahrgenommen. Im Umkehrschluss tritt das Objekt aus des Display-Ebene heraus wenn der Wert kleiner Null ist. Bei einer absoluten Parallaxe von genau null Pixel ist das Objekt genau auf der Display-Ebene, dies wird deshalb auch "Zero Parallax Plane" genannt. Die absolute Parallaxe sorgt über eine Vergenz der Augen für den Effekt der okulomotorischen Stereopsis.

Die relative Parallaxe ist die Differenz der absoluten Parallaxen zweier Objekte. Sie steht somit in Verhältnis zum Tiefenabstand zwischen zwei Objekten. Die unterschiedlichen Disparitäts-Winkel welche hier durch die relative Parallaxe erzeugt werden, sind der Ursprung der patenten Stereopsis.

Dreidimensionaler Raum wird sowohl in VR als auch bei S3D-Filmen für den Fernseher oder die Leinwand durch monokulare und binokulare Tiefenwahrnehmung aufgebaut. Sowohl die patente als auch die okulomotorische Stereopsis gehören zur binokularen Tiefenwahrnehmung, dass bedeutet es werden für diese beide Augen

benötigt. Für beide Augen muss dafür ein separates Bild dargestellt werden.

Bei Displays oder einem Projektor werden für die S3D-Darstellung eines Filmes zwei getrennte Bilder auf die gleiche Fläche projiziert. Diese werden dann je nach Technologie, beispielsweise dem Shutter-3D-System oder dem 3D-Polarisationssystem, auf unterschiedliche Weise für das jeweilige Auge gefiltert.

Die VR-Technologie unterscheidet sich von dieser, da hier zwei voneinander getrennte Displays zum Einsatz kommen. Dabei sieht das jeweilige Auge immer nur das ihm zugehörige Display. Die Software berechnet dabei in der virtuellen Umgebung über zwei Kameras (oder eine zweifach berechnete Kamera), welche die Augen im digitalen Raum ersetzen, maßgeschneiderte Bilder, die durch die absolute und relative Parallaxen und den monokularen Depth-Cues Räumlichkeit erzeugen.

Diese Ausarbeitung setzt sich primär mit der okulomotorischen und patenten Stereopsis, genauer mit den Grenzkonflikten dieser Effekte auseinander.

Grenzen des 3D-Sehen

Die C/A-Ratio beschreibt das Verhältnis zwischen Konvergenz und Akkomodation. Die subjektive Wahrnehmung von stereoskopischem Content ist unterschiedlich und auch von der C/A-Ratio abhängig.¹ Wenn diese C/A-Ratio einen gewissen Wert übersteigt empfindet der Betrachter dies als Unangenehm.

Die *Zone-of-Comfort* beschreibt den Bereich innerhalb dem sich die C/A-Ratio befinden darf, ohne dabei für den Betrachter als unangenehm empfunden zu werden. Das Verhältnis zwischen Konvergenz und Akkomodation sollte bei Abständen von 0,1m bis 10m nicht stark von eins abweichen. Bei größeren Entfernungen ist eine

größere Varianz zulässig.² Ebenfalls können von Nutzer zu Nutzer verschiedene Grenzen der Zone-of-Comfort festgestellt werden. Visueller Komfort oder Diskomfort ist ein Effekt, der bei speziellen C/A-Ratios auftritt.³ C/A-Ratios bei welchen der Nutzer keine zusätzliche Anstrengung aufbringen muss, um dargestellte Objekte zu sehen, werden als visuell komfortabel bezeichnet. Bei visuellem Diskomfort muss sich der Betrachter anstrengen um die Bilder sauber wahrzunehmen.

Als Querdisparität wird die unterschiedliche Bildlage auf der Netzhaut der einzelnen Augen bezeichnet. Diese Disparitäten dürfen im Blickfeld $\pm 0,6^\circ$ um die Sehachse 40 Winkelminuten nicht überschreiten. Im $\pm 6^\circ$ Blickfeld sollten sie maximal 70' bis 90' betragen. Konflikte bei S3D-Content in Bezug auf diese Querdisparitäten entsteht, wenn die relative Parallaxe, zweier sich überlappenden Objekte, zu groß wird.

Methodik

Wie schon zu Beginn der Arbeit erwähnt, ist es das Ziel, Komfortzonen innerhalb der okulomotorischen und patenten Stereopsis für VR-Anwendungen aufzuzeigen. Die Methodik, derer sich in dieser Arbeit bedient wird, basiert dabei auf einem Probandentest, der untersucht, wo diese Grenzen des Angenehmen und Unangenehmen im VR-Raum liegen. Der benötigte VR-Raum wurde dabei speziell für diese Untersuchungen konzipiert und entwickelt. Probandentest und Entwicklungsumgebung werden im Folgenden genauer erläutert.

Operationalisierung

Die zu messenden Ergebnisse werden durch sogenannte Komfortzonen repräsentiert, welche

¹ Shibata, Kim, Hoffman, Banks (2011)

² Ebd.

³ Ebd.

einen Bereich eingrenzen, in dem die Wahrnehmung von S3D-Inhalten in einer VR-Umgebung angenehm ist. Im Umkehrschluss lassen sich daraus Regeln ableiten, die Aufschluss über die Grenzen der angenehmen Wahrnehmung geben. Diese sollen dem Entwickler einer VR-Applikation Anhaltspunkte geben, seinen Nutzern ein bestmögliches Erlebnis zu bieten.

Um diese Komfortzonen ordnungsgerecht zu trennen, müssen diese ihren jeweiligen Zuständigkeitsbereichen zugeordnet werden. Einerseits für die okulomotorische Stereopsis und andererseits für die patente Stereopsis.

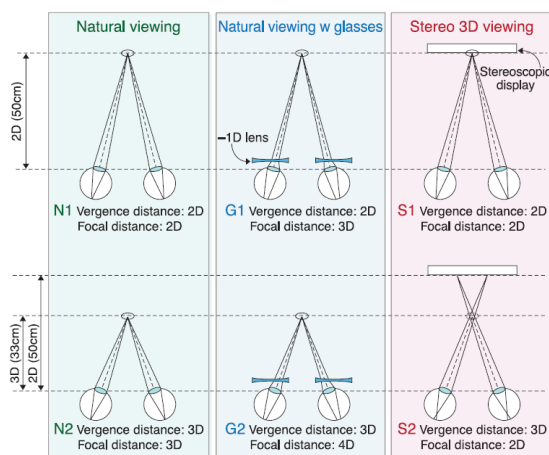


Abbildung 3.1: Auszug aus "The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays" von Shibata, Kim, Hoffman, Banks zur Verdeutlichung von C/A-Konflikten⁴

Erstere befasst sich mit Vergenz-Akkommodation-Konflikten – also dem Verhältnis von Vergenz- zu Akkommodation-Distanz des Auges (C/A-Ratio). In der Arbeit von Shibata, Kim, Hoffman und Banks werden diese Verhältnisse recht gut beleuchtet, weshalb an dieser Stelle auf Abbildung 3.1 referenziert sei. Diese Abbildung verbildlicht, dass Objekte eines Stereo-3D (S3D) Displays aus dem Bildschirm heraus zeigen können, sodass das menschliche Auge darauf

konvergiert. Der Punkt der Akkommodation bleibt jedoch weiterhin auf dem Display, wodurch sich ein Konflikt in der C/A-Ratio ergibt.

Da diese Arbeit jedoch auf VR-Brillen und nicht auf S3D-Fernseher spezialisiert sein soll, müssen in der Abbildung noch einige Anpassungen vorgenommen werden. Der größte Unterschied liegt dabei in dem Linsensystem, welches zwischen Auge und Display positioniert ist. So hat es den Anschein, das Auge des Betrachters wäre nur wenige Zentimeter vom Display entfernt, jedoch wird dieses durch die Linsen in eine bestimmte Entfernung nach hinten projiziert. Dadurch ergibt sich eine gewisse Schwierigkeit, die jeweiligen Distanzen für die Akkommodation und Vergenz des Auges zu bestimmen, insbesondere, da die Brennweite der HTC-Vive nicht bekannt ist. Abbildung 3.2 komplettiert vorherige Abbildung von Shibata und führt in diesem Zuge ein Linsensystem ein. Der Konflikt zwischen Akkommodation und Konvergenz kann auch hier dargestellt werden.

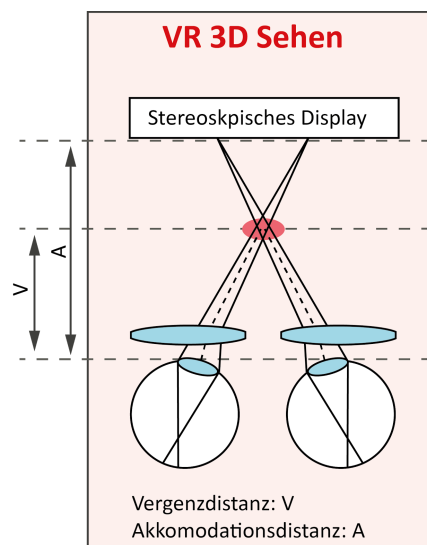


Abbildung 3.2: Ergänzung zu den C/A-Konflikten von Shibata, Kim, Hoffman und Banks

Üblicherweise werden diese Distanzen unter anderem in Metern angegeben, weshalb auch die Untersuchung dieser Arbeit in Metern erfolgen

⁴ Shibata, Kim, Hoffman, Banks (2011, S. 2)

wird. Aufgrund eben angesprochener Problematik wird sich dabei jedoch nicht auf physikalische Meter bezogen, wie es bei Shibata der Fall ist, sondern auf das metrische System der Entwicklungsumgebung Unity. Da alle Messungen in Unity vorgenommen werden, ist es kritisch anzusehen, ob ein in Unity gemessener Meter auch tatsächlich einem physikalischen Meter entspricht. Laut Alan Thorn in Mastering Unity 5.x scheint dies der Fall zu sein, weshalb in dieser Arbeit der Einheit Meter gleichbedeutend für beide Systeme verwendet werden soll.⁵

Was genau soll diese Distanz messen? Diese soll jene Entfernung vom Auge des Betrachters angeben, ab der das Verhältnis zwischen Vergenz- und Akkommodation-Distanz aus dem Gleichgewicht gerät, sodass die Wahrnehmung für den Betrachter keine Angenehme mehr ist. Um dies nochmals anhand Abbildung 3.2 zu erläutern: Wenn also gilt, dass $V \ll A$, sodass das Verhältnis zwischen beiden derart klein wird und infolgedessen eine unangenehme Wahrnehmung entsteht.

Eine weitere Möglichkeit diese Zone anzugeben, beruht auf dem Prinzip der absoluten Parallaxe, die in Pixeln angegeben wird. Dieser Aspekt ist ursprünglich dafür verantwortlich, dass es im menschlichen Auge überhaupt zu einem Vergenz-Akkommodation-Konflikt kommt. Die absolute Parallaxe beschreibt dabei die horizontale Verschiebung eines Objekts zwischen dem rechten und linken Bild, sodass dieses für das Auge scheinbar aus dem Bildschirm herauszuragen scheint. Aus diesem Grund werden die Angaben zu dieser Komfortzone ebenfalls in Pixeln vorgenommen.

Da die Wahrnehmung von Person zu Person unterschiedlich ist, kann das Ergebnis dieser Untersuchung keine absolute Distanz sein, sondern wird als eine Zone aufgefasst. Diese beschreibt den Bereich, ab dem die

Wahrnehmung von S3D-Inhalten in VR-Umgebungen aufgrund des Vergenz-Akkommodation-Verhältnisses angenehm ist. Es ist demzufolge die Rede von der von Fry aufgestellten *Zone of Clear Single Binocular Vision* (ZCSBV).⁶ Zur Abgrenzung der Ergebnisse in dieser Arbeit, soll jedoch von folgendem Begriff die Rede sein: *Komfortzone Okulomotorischer Stereopsis* (KOS). Eine Abwandlung dieser von Shibata ist auf Abbildung 3.3 zu betrachten.

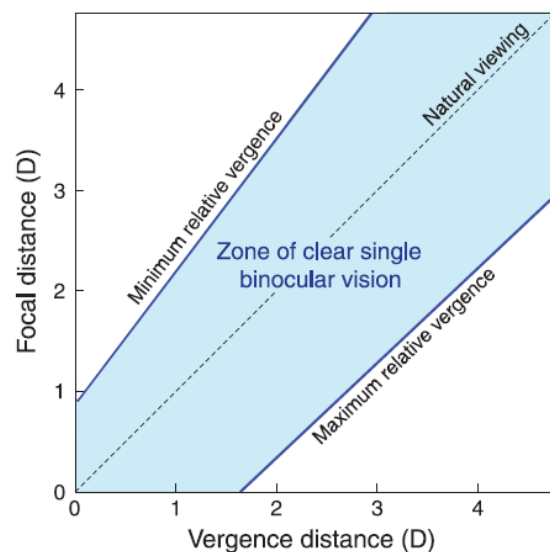


Abbildung 3.3: Zone of clear single binocular vision. Abwandlung von Fry durch Shibata, Kim, Hoffman, Banks.⁷

Die zweite Frage mit der sich diese Arbeit beschäftigt, widmet sich einer weiteren Komfortzone, die sich jedoch auf die Fähigkeit zur patenten Stereopsis bezieht. Es geht dabei um binokulare Disparitäten, die durch Projektionen mehrerer Objekte unterschiedlicher Entfernungen auf der Retina hervorgerufen werden. Die daraus resultierenden Winkelsummen auf beiden Retinae können dabei verantwortlich für unangenehme S3D-Wahrnehmung sein und sollten deshalb einen gewissen Winkel nicht überschreiten dürfen.

⁵ Thorn (2017, S. 24)

⁶ Fry (1939, S. 325–334)

⁷ Shibata, Kim, Hoffman, Banks (2011, S. 5)

Da es mit der verfügbaren Technik nicht möglich ist die Winkelsummen der retinalen Disparität zu messen, beziehen sich die Ergebnisse dieser Untersuchungen auf die Distanz eines Vordergrund- und eines Hintergrundobjektes und deren relative Distanz zueinander. Diese Werte werden jeweils wieder in Metern angegeben.

Veranschaulicht wird das Szenario auf Abbildung 3.4. Zu erkennen ist die relative Distanz R zwischen zwei Objekten. In Abhängigkeit von R entsteht an dieser Stelle ein Konflikt der patenten Stereopsis. Je größer R , desto wahrscheinlicher und stärker wird sich dieser Effekt, aufgrund der höheren retinalen Disparität, ausprägen.

In S3D-Produktionen wird dieser Effekt durch relative Parallaxen erzielt. Demzufolge erfolgt die Angabe dieser Komfortzone zusätzlich in Pixeln – also relativen Parallaxen. Dieser Bereich soll im Rahmen dieser Arbeit die *Komfortzone Patenter Stereopsis (KPS)* genannt werden.

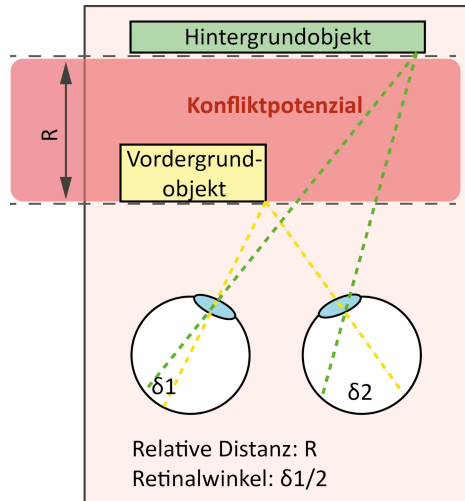


Abbildung 3.4: Konfliktpotenzial und skizzenhafte Funktionsweise der patenten Stereopsis.

Testumgebung

Zur Konstruktion eines entsprechenden VR-Raumes wurde sich auf die Entwicklungsumgebung Unity geeinigt. Dieser VR-Raum soll dabei in der Lage sein, die Bearbeitung der Forschungsfrage möglich zu

machen - also Aufschlüsse über die Komfortzonen okulomotorischer und patenter Stereopsis geben. Die Wahl einer geeigneten VR-Brille fiel dabei auf die HTC Vive. Beide Entscheidungen wurden aus Gründen der Verfügbarkeit getroffen und nicht, weil eines der Produkte spezielle Anforderungen erfüllen könne, die ein anderes Produkt dieser Art nicht erfüllen kann.

Im Umkehrschluss kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse für sämtliche VR-Produktionen unterschiedlicher Entwicklungsumgebungen gelten können, da von hypothetischen Unterschieden im Rendering oder den verwendeten Maßeinheiten ausgegangen werden muss. Diese aufzuzeigen oder zu beweisen liegt dabei nicht im Aufgabenfeld dieser Arbeit.

Auch auf Seiten der Hardware einer VR-Brille kann es zu Verzerrungen der Wahrnehmung kommen. Das Linsensystem der HTC Vive und die Platzierung und Auflösung der Displays können dabei Einfluss auf das Empfinden eines VR-Raums haben. Aus diesen Gründen werden innerhalb dieser Arbeit zwar Regeln für die komfortable Wahrnehmung von S3D-Inhalten abgeleitet, jedoch kann außerhalb von der hier verwendeten Test-Umgebung nicht generell davon ausgegangen werden, dass diese Ergebnisse auch dieselbe Gültigkeit besitzen.

Ein Großteil der Untersuchungen dieser Arbeit basieren auf den Erkenntnissen von Shibata, Kim, Hoffman und Banks in *The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays*.

Deren Komfortzone für S3D-Inhalte entspricht dabei der in dieser Arbeit betrachteten *Komfortzone Okulomotorischer Stereopsis*, wobei jedoch einige Einschränkungen hinsichtlich der Nutzung von VR-Geräten getroffen werden müssen. Wie auf Abbildung 3.5 von Shibata et. al. zu erkennen ist, gibt es bei der Perzeption von S3D-Inhalten sowohl eine Nah- als auch eine Ferngrenze, die den komfortablen

Wahrnehmungsbereich abstecken. Bei VR-Anwendungen - zumindest im Hinblick auf die in dieser Arbeit verwendete Testumgebung - entfällt diese Ferngrenze. Das bedeutet, dass lediglich negative Parallaxen entstehen können und der Entwickler demzufolge auch keine Bedenken haben muss, seine Nutzer einem okulomotorischen Konflikt durch positive Parallaxen auszusetzen. Positive Parallaxen bedeutet hier, dass in der VR-Anwendung Vergenz-Distanzen erzeugt werden, die größer sind als die Akkommodation-Distanz.

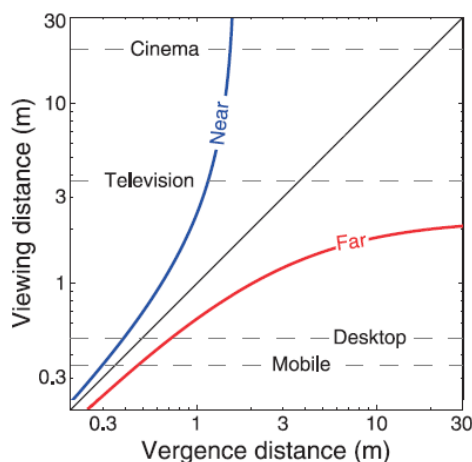


Abbildung 3.5: Nah- und Ferngrenzen der Komfortzone für die okulomotorische Stereopsis in Abhängigkeit der Betrachtungsentfernung. Abbildung nach Shibata, Kim, Hoffman, Banks.⁸

Die Begründung dafür liegt hauptsächlich in der Parallelität der verwendeten Render-Kameras. Diese erzeugen auf den Displays ein S3D-Bild, das seine *Zero-Parallaxe-Plane* theoretisch im Unendlichen hat. Im Unendlichen deshalb, da parallele Kameras niemals einen gemeinsamen Konvergenzpunkt haben werden. Diese *Zero-Parallaxe-Plane* entspricht der Linie des normalen Sehens, welche auf Abbildung 3.5 als schwarze durchgezogene Linie zu sehen ist. An dieser Stelle ist das Verhältnis zwischen Vergenz-Distanz und Akkommodation-Distanz

gleich Eins. Das wiederum bedeutet, dass lediglich negative Parallaxen zugelassen werden. Korrekterweise muss diesbezüglich jedoch erwähnt werden, dass es dennoch möglich ist, positive Parallaxen zu erzeugen. Dies wird erzielt, indem in das Rendering der Unity-Kameras eingegriffen wird und einhergehend die Stereo-Konvergenz dieser verändert wird, sodass diese eben nicht mehr parallel zueinander stehen. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, eine *Horizontal Image Translation* (H.I.T.) auf die Szene anzuwenden. In beiden Fällen wird die *Zero-Parallaxe-Plane* verschoben, sodass potenzielles Konfliktpotenzial zusätzlich zur Nahgrenze, auch hinsichtlich einer Ferngrenze beachtet werden muss.

Zuvor wurde behauptet, dass die *Zero-Parallaxe-Plane* im Unendlichen liegt. Dies ist praktisch gesehen nicht ganz korrekt, da eine hardwareseitige Limitierung durch die Auflösung des Displays der VR-Brille vorliegt. Das bedeutet, dass nur dann absolute und relative Parallaxen auf dem Display angezeigt werden können, wenn diese auch mittels Pixeln abbildbar sind. Dementsprechend gibt es eine maximale Entfernung bei der HTC Vive, bis zu der die scheinbar im Unendlichen liegende *Zero-Parallaxe-Plane* abgebildet werden kann. Hinter dieser Grenze existieren keine Pixel mehr, die Parallaxen abbilden können und demzufolge auch keine patente oder okulomotorische Stereopsis. Für die Methodik dieser Arbeit ist dieses Erkenntnis insofern relevant, dass die Begrenzung der Komfortzone Okulomotorischer Stereopsis in der Ferne nicht nötig ist, solange der Standardbetrieb von Unity und der HTC Vive vorausgesetzt ist.

Unter Standardbetrieb soll an dieser Stelle folgendes verstanden werden: Die integrierte Schnittstelle von Unity für die Kommunikation zu einer VR-Brille, wie z.B. die HTC Vive, ist relativ fest vorgegeben. Es ist die Rede von der

⁸ Shibata, Kim, Hoffman, Banks (2011, S.23)

sogenannten OpenVR Bibliothek von Unity. Im Standardbetrieb übernimmt diese Schnittstelle die Anpassung und Handhabung jeglicher Parameter für die S3D Render-Kamera. Darunter fallen auch Parameter wie die Stereobasis oder die Konvergenz der Kameras. Das bedeutet, dass im Normalbetrieb die Manipulation dieser Werte erst gar nicht ermöglicht wird, weshalb eben von einer *Zero-Parallaxe-Plane* im Unendlichen ausgegangen wird.

Zudem wird im Normalbetrieb mithilfe des Multipass-Verfahrens gerendert. Dieses Verfahren setzt lediglich eine Kamera voraus, die vereinfacht gesprochen in der Szene nach links und rechts versetzt wird, um S3D-Bilder zu produzieren. Um dennoch absolute und relative Parallaxen einer Szene zu berechnen, ist es notwendig, Zugriff auf beide Render-Kameras zu haben. Da dies anscheinend im Multipass-Verfahren nicht möglich ist, wurde für die Entwicklung der Testumgebung auf das Singlepass-Verfahren mit zwei unabhängig existierenden Kameras gesetzt. Auf dieser Basis ist es möglich, zu jedem Punkt in der Unity-Szene die absolute Parallaxe zu bestimmen.

Mathematisch wurde dies gelöst, indem ein Punkt im dreidimensionalen Raum jeweils in eine zweidimensionale Koordinate auf dem gerenderten Bild der beiden Kameras umgerechnet wurde. Die Differenz beider Kamera-Koordinaten eines Punktes im 3D-Raum ergeben dabei die absolute Parallaxe dieses Punktes.

Die Herausforderung der Anwendung besteht nun darin, die absolute und relative Parallaxe jenes Punktes zu bestimmen, auf den der Proband auch konvergiert. Dazu wird in die Szene der Anwendung ein Würfel integriert, der eine Zielscheibe als Textur besitzt. Ein Aufbau dieser Szene kann Abbildung 3.6 entnommen werden. Die absolute Parallaxe, die für das Ergebnis dieser Arbeit relevant ist, wird von der Mitte der

Vorderseite dieses Würfels berechnet. Dieser Punkt soll als Fokuspunkt bezeichnet werden und ist auf Abbildung 3.6 als F gekennzeichnet. Dieses Objekt sei fortan als das Vordergrundobjekt (VO) bezeichnet.

Das VO ist auf einer fest definierten Achse innerhalb der Szene bewegbar, die auf Abbildung 3.6 als weißer Doppelpfeil gekennzeichnet ist. Diese Achse hat ihren Ursprung im gemeinsamen Zentrum beider Kameras (Z) und verläuft orthogonal von diesen weg. Das VO kann demzufolge von der Anwendung auf den Betrachter zu und von diesem weg bewegt werden. Dadurch wird gewährleistet, dass das VO aus der potenziellen *Komfortzone Okulomotorischer Stereopsis* heraus und hineingeschoben werden kann.

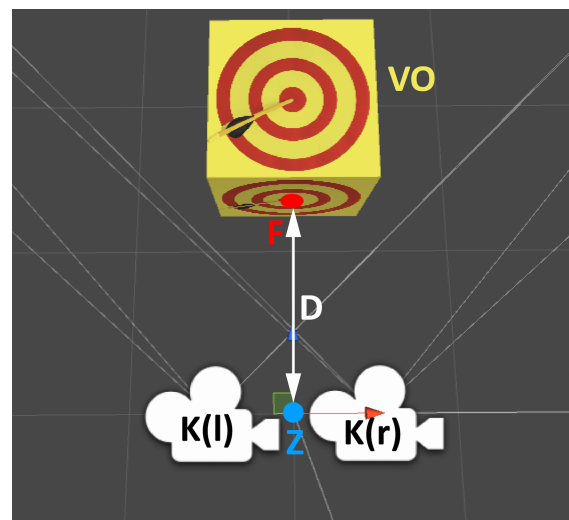


Abbildung 3.6: Aufbau der Testumgebung in Unity für die Ermittlung der KOS.

Der Würfel besitzt keine absoluten Maße, sondern passt seine Größe relativ zu der jeweiligen Distanz an. Dies hat den Effekt, dass der Würfel, obgleich in welcher Entfernung er zum Betrachter steht, stets eine von diesem als konstant wahrgenommene Größe beibehält. Wäre dem nicht so, wäre der Würfel entweder in weiter Entfernung kaum noch zu erkennen oder aber in kurzer Distanz bildschirmfüllend. In beiden Fällen beeinträchtigt dies die Fähigkeit des

Probanden, sich konstant auf den Würfel zu fixieren. Zweiteres würde die Möglichkeit, Konflikte der patenten Stereopsis zu erkennen, vollkommens unterbinden. Die mathematische Formel für die Berechnung der relativen Skalierung (S) setzt sich dabei folgendermaßen zusammen: $S = D/12$.

Die Variable D wird auf Abbildung 3.6 verbildlicht und repräsentiert die aktuelle Entfernung zwischen F und Z. Vereinfacht gesprochen kann die Skalierung als ein Zwölftel der Distanz zwischen Betrachter und VO in Metern verstanden werden.

Auch die Geschwindigkeit des Würfels, mit dem sich dieser dem Probanden nähert oder entfernt, verhält sich nicht konstant. Die Geschwindigkeit verhält sich ebenfalls in Abhängigkeit zur Entfernung vom Betrachter. Je näher der Würfel, desto langsamer bewegt sich dieser; Je weiter entfernt, desto schneller. Die Formel für die Geschwindigkeit (V) in Meter pro Sekunde zu einer aktuellen Entfernung setzt sich folgendermaßen zusammen: $V = D/4$. Wobei V durch ein Maximum von 2m/s begrenzt wird.

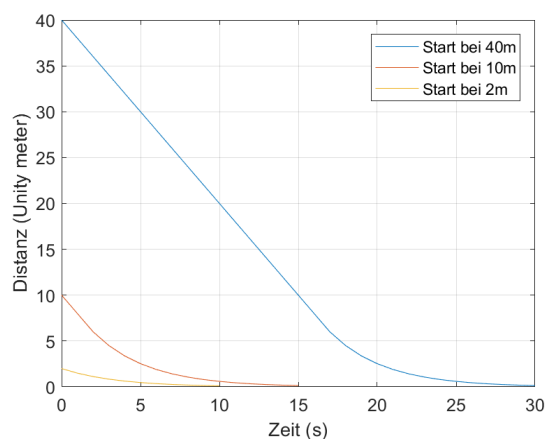


Abbildung 3.7: Verhältnis von zurückgelegter Strecke und Zeit des Vordergrundobjekts.

Die Begrenzung durch ein oberes Limit hat einerseits den einfachen Hintergrund, dass die Konzentrationsfähigkeit des Probanden bei einer 40m zu durchlaufenden Testbahn nicht

strapaziert werden soll und andererseits, dass die Komfortzonen in weiteren Distanzen um einiges größer sind. Die zurückgelegte Entfernung im Verhältnis zur Zeit, kann unter Abbildung 3.7 betrachtet werden.

Da für die Bestimmung der *Komfortzone Patentsteropsis* zwei Referenzobjekte nötig sind, wird für diesen Anwendungsfall ein weiteres Objekt in die Szene integriert. Dieses sei genannt das Hintergrundobjekt (HO) und besitzt die Form einer Kachelwand, die sich bildschirmfüllend in den Hintergrund platziert. Im Gegensatz zum VO ist das HO fixiert und kann innerhalb eines Testdurchlaufes nicht bewegt werden. Nur mithilfe von diesem wird es möglich sein, eine relative Parallaxe zu berechnen. Diese ergibt sich aus der Differenz zwischen der absoluten Parallaxe des VO und des HO. Wiederum durch Bewegen des VO kann innerhalb eines Probandentests ein Bereich festgelegt werden, der die Charakteristiken einer *Komfortzone Patentsteropsis* definiert. Der Aufbau der dafür vorgesehenen Testumgebung kann Abbildung 3.8 entnommen werden.

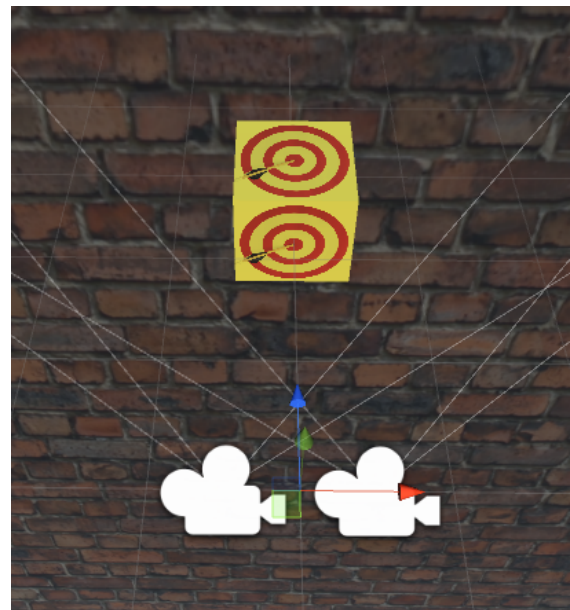


Abbildung 3.8: Aufbau der Testumgebung für die Ermittlung der KPS. Bezeichnungen können aus Abbildung 3.6 übernommen werden

Für beide Szenarien (*KOS* und *KPS*) wurden jeweils einige Testdurchläufe in die Anwendung implementiert, die es möglich machen sollen, konsistente und verwertbare Ergebnisse zu der Forschungsfrage dieser Arbeit zu liefern. Wie diese genau aufgebaut sind, wird im nachfolgenden Kapitel zum Probandentest geklärt werden.

Probandentest

Zuvor wurde die Anwendung beschrieben, auf Basis derer die Durchführung eines geeigneten Probandentests möglich ist. Dieser soll im Folgenden erläutert werden.

Jeder Proband soll in diesem Test insgesamt acht verschiedene Testszenarien durchlaufen, aus denen die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit entspringen werden. Zwei dieser Tests beziehen sich dabei auf die *Komfortzone Okulomotorischer Stereopsis* und sechs davon auf die *Komfortzone Patent Stereopsis*. Vor Beginn aller Teilttests sollen die Probanden mit Hilfe eines in der Anwendung eingeblendeten Textes über den Ablauf unterrichtet werden.

Die Initiierung eines Teilttests wird durch die Betätigung einer Taste durch den Probanden unternommen. Zwischen jedem Teilttest werden die Displays des Probanden in der VR-Brille abgedunkelt, um die Augen zu entspannen.

Zuerst sollen die Szenarien für die *KOS* erläutert werden. Hierbei wurde in zwei Teilttests untergliedert. Bei ersterem wird das VO in einer Distanz von zwei Metern vom Betrachter platziert. Durch Bestätigung des Probanden bewegt sich das VO langsam auf den Betrachter zu. Dabei, so wurde dieser instruiert, sollte er die Zielscheibe des voranschreitenden Würfels fixieren. Sollte es zu einem unangenehmen Gefühl in der Wahrnehmung kommen, so sollte der Proband mit einer Taste bestätigen.

Bei diesem Test wird festgehalten, in welcher Distanz bzw. ab welcher absoluten Parallaxe für

den Probanden die subjektive Grenze zum Unangenehmen liegt. Das Objekt wurde dabei von einem angenehmen Zustand in einen unangenehmen Zustand überführt. Die gemessene Entfernung und absolute Parallaxe zu diesem Zeitpunkt werden festgehalten, um Aussagen über die *KOS* machen zu können. Dieser Teilttest soll namentlich festgehalten werden als: *KOS_DISKOMFORT*.

Der zweite Teilttest besitzt einen ähnlichen Ablauf, wobei diesmal von einem unangenehmen Anfangszustand ausgegangen wird, der kontinuierlich in einen angenehmeren überführt wird. Dies bedeutet, der Würfel startet mit einer Entfernung von 0,25 Metern vom Betrachter und entfernt sich langsam von diesem. In diesem Teilttest ist der Proband abermals dazu aufgefordert mithilfe einer Taste zu bestätigen, diesmal jedoch, wenn die wahrgenommene Szene beginnt angenehm zu werden. Ebenfalls werden gemessene Distanz in Metern und absolute Parallaxe des Objekts festgehalten. Dieser Teilttest soll namentlich festgehalten werden als: *KOS_KOMFORT*.

Mit diesen zwei Teilttests sind die Durchläufe für die *KOS* abgeschlossen, weshalb nachfolgend noch die sechs Teilttests der *KPS* betrachtet werden sollen. Diese besitzen ablauftechnisch dasselbe Verfahren wie die *KOS*-Tests, weshalb nicht nochmals im Detail darauf eingegangen werden muss. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass bei diesem Verfahren ein Hintergrundobjekt in einer gewissen Entfernung eingesetzt wird. Dieses soll zusammen mit dem davor platzierten Würfel bei dem Betrachter Konflikte in der patenten Stereopsis auslösen - also die relativen Parallaxen betreffend.

Die sechs Teilttests werden dabei nach Drei verschiedenen Distanzen gestaffelt. In diesen Entfernungen wird jeweils das Hintergrundobjekt platziert. Es werden folgende Entfernungen verwendet: {2m, 10m, 40m}. Zu jedem dieser drei

Entfernungen werden je zwei Teilttests gemäß dem vorigen Verfahren durchgeführt.

Ein ersterer, bei dem das VO auf Höhe des HO startet und durch langsame Annäherung an den Betrachter einen Konflikt der patenten Stereopsis auslöst (jeweils gekennzeichnet als DISKOMFORT). Ein zweiter Teilttest, bei dem das VO mit einer hohen, relativen Entfernung zum HO beginnt und langsam einem potenziellen Konflikt der patenten Stereopsis auflöst (jeweils gekennzeichnet als KOMFORT). Somit ergeben sich namentlich folgende sechs Teilttests:

- KPS_2M_DISKOMFORT
- KPS_2M_KOMFORT
- KPS_10M_DISKOMFORT
- KPS_10M_KOMFORT
- KPS_40M_DISKOMFORT
- KPS_40M_KOMFORT

Ergebnisse

Durchgeführt wurde der Probandentest mit 33 zufälligen Teilnehmern, welche sich alle freiwillig zu diesem Test gemeldet hatten. Unter diesen waren 11 Teilnehmer mit weiblichem und 22 mit männlichem Geschlecht, in einem Alter zwischen 18 und 59 Jahren. Darunter jedoch hauptsächlich junge Studenten. Ebenso wurde eine Unterteilung zwischen Sehhilfe und keine Sehhilfe unternommen, wobei 13 eine Sehhilfe angegeben hatten. Zudem wurden die Probanden nach ihrer Erfahrung mit VR-Inhalten befragt, um möglicherweise auch hier eine Regel für die Grenzkonflikte ableiten zu können.

Um die zu messenden Ergebnisse dieser Arbeit nochmals zu erwähnen, sei da die *Komfortzone Okulomotorischer Stereopsis* und die *Komfortzone Patenter Stereopsis*. Zweiteres stellt in gewisser Weise einen Sonderfall dar, da es beim Probanden die Fähigkeit zur patenten Stereopsis voraussetzt. Diese konnte mit Hilfe eines

Randomdot-Tests bei allen Teilnehmern festgestellt werden.

Jeder Proband durchlief den Test komplett und absolvierte dabei insgesamt acht verschiedene Testszenarien, aus denen die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit entspringen. Genutzt wurde hierfür eine HTC Vive mit den im vorherigen Kapitel beschriebenen Tests.

Die Plots der Ergebnisse zeigen jeweils die Werte zum Zeitpunkt der Eingabe des Probanden. Die blauen Kreuze repräsentieren dabei den Wert, bei dem die Komfortzone verlassen wurde und ein Unwohlsein beginnt. Die roten Kreuze zeigen den Wert an, ab dem der Proband keine unangenehmen Gefühle mehr verspürt, also dem Wiedereintritt in die Komfortzone.

Okulomotorische Stereopsis

Entscheidend für Konvergenzwinkel, welche für die okulomotorische Stereopsis verantwortlich sind, ist die absolute Parallaxe eines Objektes. Die Konvergenzwinkel selbst können über die Gleichung $\beta = \text{atan}\left(\frac{1}{2} * \frac{\text{Augenabstand}}{\text{Abstand zum Objekt}}\right)$ berechnet werden. Für die Berechnung wurde ein Augenabstand von 62mm für Frauen und von 64mm für Männer angenommen.⁹

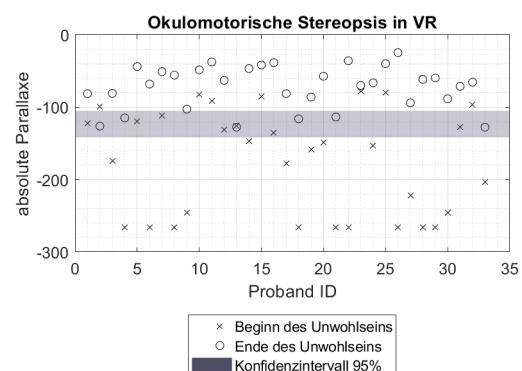


Abbildung 4.1: Absolute Parallaxen der Grenzen der okulomotorischen Stereopsis in VR-Content.

Die ersten beiden Tests zur Berechnung der KOS ergeben die in Abb. 4.1 sichtbaren Ergebnisse:

⁹ M. Millidot (2000)

Während die meisten der Probanden beim ersten Test (KOS_DISKOMFORT; blaue Kreuze) unter der -100 Pixel Marke liegen und teilweise über die -200 Pixel herausgehen, haben die meisten Probanden jedoch erst bei einer absoluten Parallaxe von über -100 Pixeln das Ende des Unbehagens angegeben (KOS_KOMFORT; rote Kreuze). Daraus ergibt sich ein Konfidenzintervall dessen Mittel bei -123 Pixeln liegt, ab dem / bis zu dem die Probanden ein unangenehmes Erlebnis hatten. Die daraus resultierenden Konvergenzwinkel sind in Abb. 4.2 ersichtlich. Die Probanden, die zuvor Parallaxenwerte von unter -200 Pixel erreicht hatten, kommen somit auf Konvergenzwinkel von über 10° .

Daraus lässt sich schließen, dass absolute Parallaxen unterhalb von etwa -123 Pixeln zu Konflikten in der okulomotorischen Stereopsis führen und damit vermieden werden sollten.

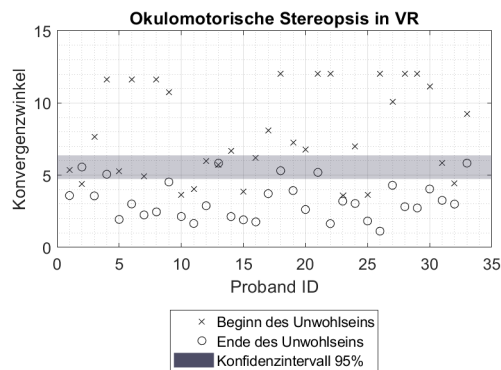


Abbildung 4.2: Konvergenzwinkel der Grenzen der okulomotorischen Stereopsis in VR-Content.

Sortiert nach Geschlecht

Um möglicherweise einen Unterschied der Empfindlichkeit für C/A-Ratio Konflikte bei Männern und Frauen zu erkennen, wurden die Messdaten nach Geschlecht sortiert. Wie in Abb. 4.3 zu sehen ist, ergeben sich bei einer solchen Sortierung keine signifikanten Unterschiede im Konfidenzintervall der Ergebnisse, abgesehen von der Verbreiterung des Intervalls welche auf die

geringere Menge an Werten zurückzuführen ist. Auch die Sortierung nach den anderen Kriterien (Sehhilfen bzw Erfahrung mit VR) der Befragung ergibt neben der erwähnten Verbreiterung keine nennenswerten Unterschiede (vgl. Abb. 4.4 & Abb. 4.5).

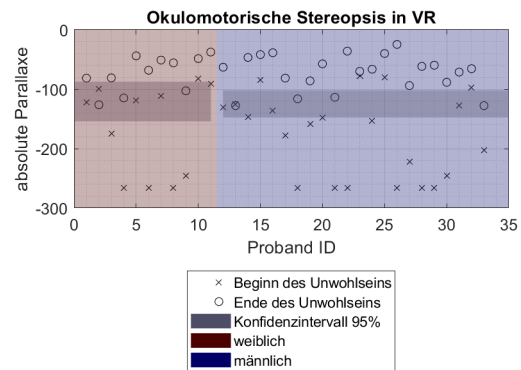


Abbildung 4.3: Absolute Parallaxen der Grenzen der okulomotorischen Stereopsis in VR-Content sortiert nach Geschlecht.

Sortiert nach Sehhilfe

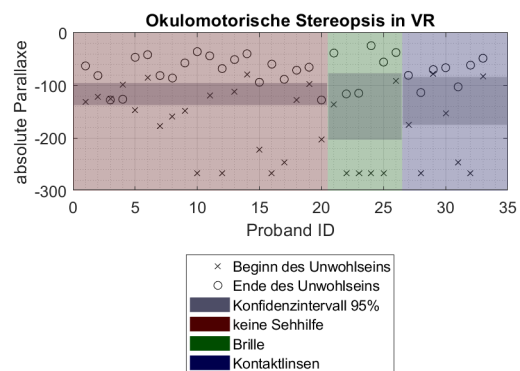


Abbildung 4.4: Absolute Parallaxen der Grenzen der okulomotorischen Stereopsis in VR-Content sortiert nach Sehhilfe.

Die Ergebnisse aus der Sortierung der Probanden nach der Erfahrung in VR (Abb. 4.5) zeigt klar eine breite Verteilung von hohen sowie niedrigen Werten in beiden Testläufen.

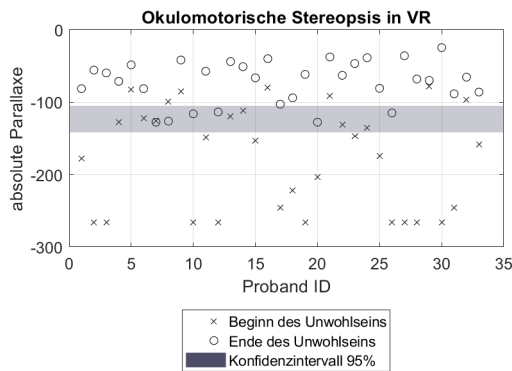
Sortiert nach Geschlecht

Abbildung 4.5: Absolute Parallaxen der Grenzen der okulomotorischen Stereopsis in VR-Content sortiert nach Erfahrung in VR. Aufsteigend von Links nach Rechts.

Patente Stereopsis

Bei der patenten Stereopsis sind die Querdisparitäten der relevante Faktor. Der Parameter, der diese widerspiegelt, ist die relative Parallaxe zwischen zwei Objekten. In unserem Aufbau also der Unterschied in der absoluten Parallaxe zwischen dem Hintergrund und dem sich auf den Betrachter zu bewegendem Würfel zum Zeitpunkt an dem der Proband die Taste gedrückt hat.

Die sich dadurch ergebende zweite Testreihe wird wie im Kapitel Methodik beschrieben in drei virtuellen Distanzen durchgeführt. Die Plots zeigen den Moment des Drückens der Probanden an. Die Kreuze repräsentieren dabei den Wert, bei dem die Komfortzone verlassen wurde und ein Unwohlsein beginnt. Die Kreise zeigen den Wert an, ab dem der Proband keine unangenehmen Gefühle mehr verspürt, also dem Wiedereintritt in die Komfortzone. Im ersten Test beträgt die Distanz 2m, im zweiten 10m und im dritten 40m.

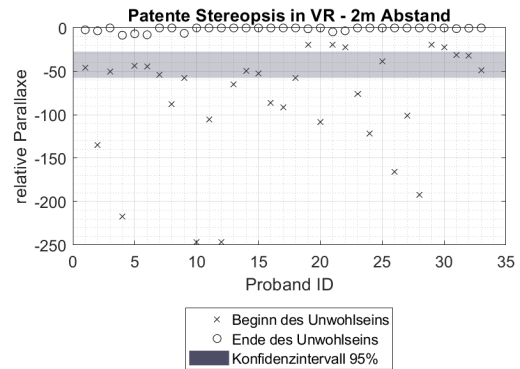


Abbildung 4.6: Relative Parallaxen der Grenzen der patenten Stereopsis, Hintergrund in 2m Abstand

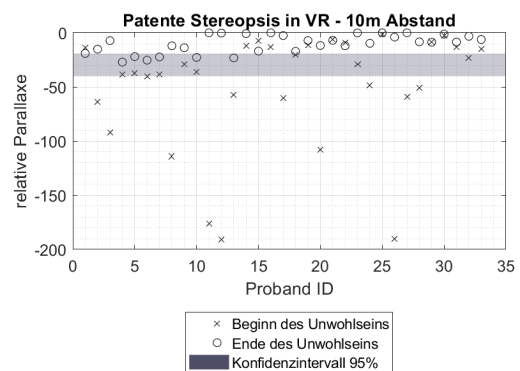


Abbildung 4.7: Relative Parallaxen der Grenzen der patenten Stereopsis, Hintergrund in 10m Abstand

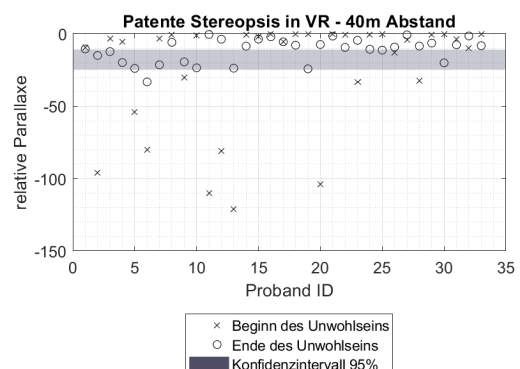


Abbildung 4.8: Relative Parallaxen der Grenzen der patenten Stereopsis, Hintergrund in 40m Abstand

Wie auf allen drei Abbildungen Abb. 4.6, Abb. 4.7 sowie Abb. 4.8 zu erkennen ist, liegen die Konfidenzintervalle oder zumindest der größte Teil davon über -50 Pixel absolute Parallaxe, die Durchschnitte liegen bei -42,5 (2m), -29,6 (10m) und -17,9 (40m), der Gesamtdurchschnitt liegt bei -30 Pixeln. Daraus kann geschlossen werden, dass sich Stereoskopische Inhalte mit Hintergrund zur Vermeidung von Konflikten in der patenten Stereopsis oberhalb von -50 beziehungsweise besser -30 Pixeln relativer Parallaxe bewegen sollten.

Auch hier kann wieder die Vermutung aufgestellt werden, dass das Geschlecht, das Tragen einer Sehhilfe oder die Erfahrung mit VR eine Rolle bei den Ergebnissen spielen könnte. Wie in Abb. 4.9 bis Abb. 4.17 zu sehen ist, scheint dies nicht der Fall zu sein. Abgesehen von den schon bei den okulomotorischen Testreihen zu beobachtende, durch kleinere Testmengen bedingt, breitere Konfidenzintervallen sind keine relevanten Unterschiede zu erkennen.

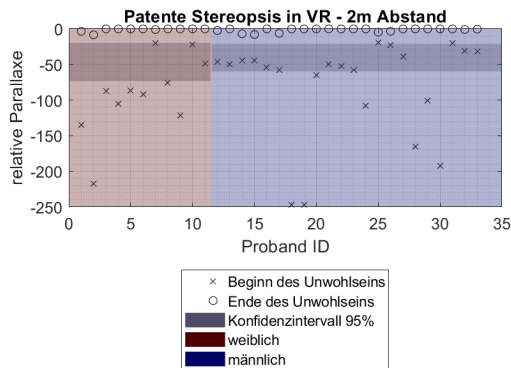


Abbildung 4.9: Relative Parallaxen der Grenzen der patenten Stereopsis, Hintergrund in 2m Abstand, sortiert nach Geschlecht

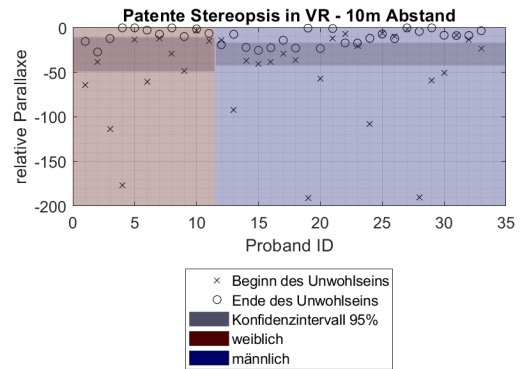


Abbildung 4.10: Relative Parallaxen der Grenzen der patenten Stereopsis, Hintergrund in 10m Abstand, sortiert nach Geschlecht

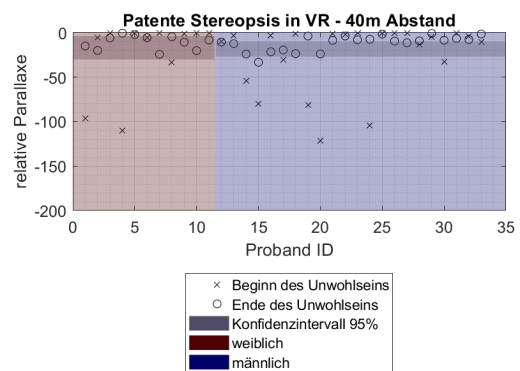


Abbildung 4.11: Relative Parallaxen der Grenzen der patenten Stereopsis, Hintergrund in 40m Abstand, sortiert nach Geschlecht

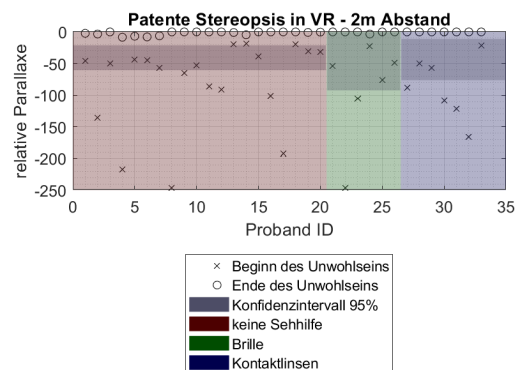


Abbildung 4.12: Relative Parallaxen der Grenzen der patenten Stereopsis, Hintergrund in 2m Abstand, sortiert nach Sehhilfe

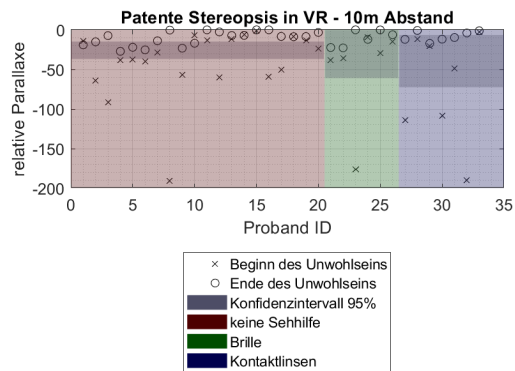


Abbildung 4.13: Relative Parallaxen der Grenzen der patenten Stereopsis, Hintergrund in 10m Abstand, sortiert nach Sehhilfe

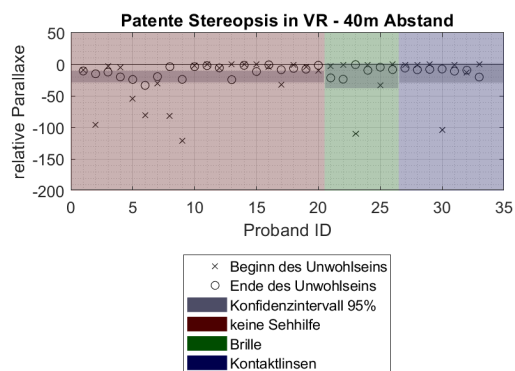


Abbildung 4.14: Relative Parallaxen der Grenzen der patenten Stereopsis, Hintergrund in 40m Abstand, sortiert nach Sehhilfe

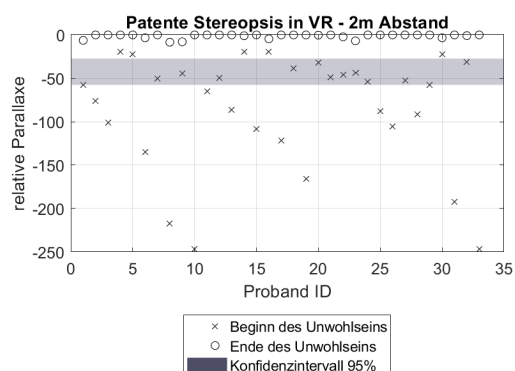


Abbildung 4.15: Relative Parallaxen der Grenzen der patenten Stereopsis, Hintergrund in 2m Abstand, sortiert nach Erfahrung in VR. Aufsteigend von links nach rechts.

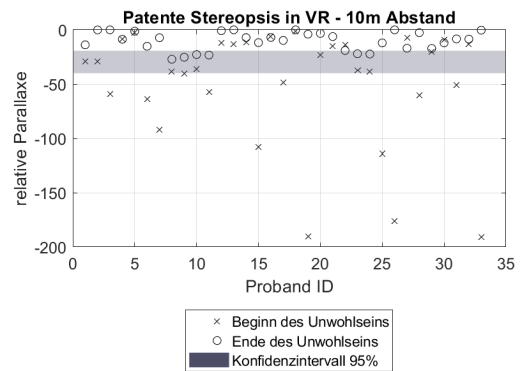


Abbildung 4.16: Relative Parallaxen der Grenzen der patenten Stereopsis, Hintergrund in 10m Abstand, sortiert nach Erfahrung in VR. Aufsteigend von links nach rechts.

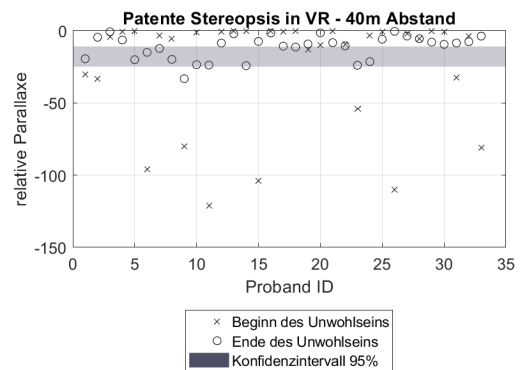


Abbildung 4.17: Relative Parallaxen der Grenzen der patenten Stereopsis, Hintergrund in 40m Abstand, sortiert nach Erfahrung in VR. Aufsteigend von links nach rechts.

Diskussion

Zur Sicherstellung der Ergebnisse müssen die Tests kritisch hinterfragt werden, um mögliche Fehler zu erkennen. Aus Gründen der Verfügbarkeit wurden jegliche Tests mit der HTC Vive durchgeführt. Falls diese aufgrund ihrer Auflösung oder anderen spezifischen Merkmalen andere Ergebniswerte liefert, lassen sich die Ergebnisse nicht auf den gesamten Virtual-Reality-Bereich übertragen.

Der Ablauf der Tests erfolgte pro Proband in der gleichen Reihenfolge. Dies könnte ein Problem darstellen, da die Augen der Probanden über die genutzte Zeit schmerzresistent werden könnten. Dies würde eine Verfälschung der letzten Ergebnisse bedeuten. Um diesem möglichen Konflikt entgegenzuwirken müssten erneute Testreihen durchgeführt werden, bei welchen die Reihenfolge der Tests zufällig ausgewählt wird.

Probanden wurden innerhalb der Tests dazu angewiesen, den Testdurchlauf mit einem einfachen Klick zu stoppen, sobald sie beim Anblick der Szene ein Unwohlsein empfinden. Unwohlsein ist eine subjektive Empfindung, was eine Operationalisierung erschwert. Um diesem Problem entgegenzusteuern wurden die Tests mit möglichst vielen Probanden durchgeführt. Dies führt zu einer Schnittmenge, die sowohl schmerzresistente, als auch schmerzempfindliche Werte beinhalten kann.

Beim Sichten der Ergebnisse fiel auf, dass sich einige Resultate im Vergleich zu den Restlichen sehr unterscheiden. Werden diese interpretiert, so haben einige der Probanden keinerlei Probleme mit okulomotorischer Stereopsis oder sind nicht in der Lage, diese wahrzunehmen. Das okulomotorische Sehen wird jedoch von Kindheit an trainiert, sonst wäre der Mensch nicht in der Lage, optimal im dreidimensionalen Raum zu interagieren. Somit liegt hier ein Widerspruch innerhalb der Ergebnisse vor.

Dies könnte auf ein Fehlverständnis oder ein Fehlverhalten der Probanden hindeuten, wie etwa der Versuch die verschiedenen Tests möglichst lange auszuhalten um dadurch die Testergebnisse zu verbessern.

Um die Auswertung nicht zu verfälschen, wurden die Ergebnisse bereinigt und die hypothetisch verfälschten Ergebnisse gestrichen. Dazu wurden bei dem Test der KOS alle Datensätze mit einer absoluten Parallaxe von unter -200 Pixeln eliminiert. Die bereinigten Ergebnisse beinhalten

noch 20 von den insgesamt 33 Datensätzen. Das bereinigte Resultat ist in Abb. 5.1 und Abb. 5.2 abgebildet.

Somit wäre das bereinigte Ergebnis eher im Bereich -90 als den zuvor berechneten -120 Pixeln absolute Parallaxe anzusiedeln, was auch die Konvergenzwinkel von 6° auf 4° verringert.

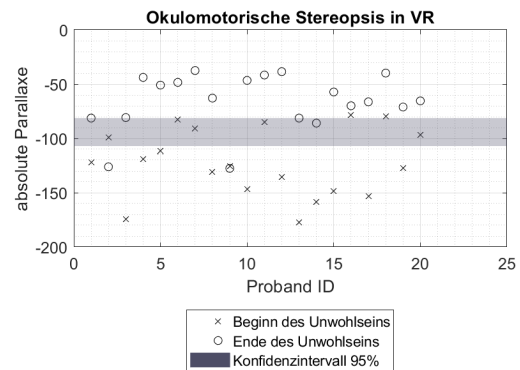


Abbildung 5.1: Absolute Parallaxen der Grenzen der okulomotorischen Stereopsis in VR-Content, bereinigter Datensatz

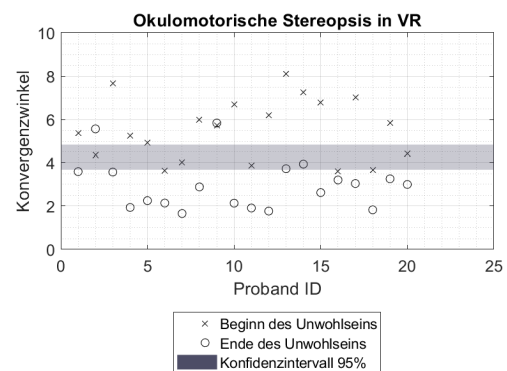


Abbildung 5.2: Konvergenzwinkel der Grenzen der okulomotorischen Stereopsis in VR-Content, bereinigter Datensatz

Ein Widerspruch der Ergebnisse zeigt sich ebenfalls bei den Tests zur patenten Stereopsis. Anhand der Werte, die einige Probanden angegeben haben, wären sie nicht in der Lage, patente Stereopsis wahrzunehmen, da diese bereits so nah am Betrachter sind, dass dieser

bereits ein Diskomfort aufgrund der okulomotorischen Stereopsis spüren sollte.

Zu Beginn der Tests wurde jedoch bei jedem Probanden durch den Randomdot-Test festgestellt, dass dieser zur patenten Stereopsis fähig ist.

Durch die große Zahl der Probanden lassen sich auch hier die Ergebnisse bereinigen. Dafür wurden alle Datensätze mit einer relativen Parallaxe von unter -150 Pixeln gefiltert. Diese bereinigten Testdaten, zu sehen in Abb. 5.3, Abb. 5.4 und Abb. 5.5, zeigen nun verstärkt eine einheitliche Tendenz der Konfidenzintervalle auf. Der somit errechnete Durchschnitt liegt bei -20 Pixeln relative Parallaxe.

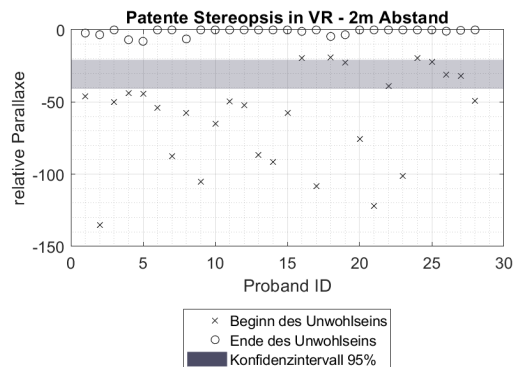


Abbildung 5.3: Relative Parallaxen der Grenzen der patenten Stereopsis, Hintergrund in 2m Abstand, bereinigter Datensatz

Für einen genauen Vergleich der Ergebnisse von Shibata, Kim, Hoffman und Banks und den Tests in der VR-Umgebung aufstellen zu können, müssen zunächst diese im Vergleich kritisch hinterfragt werden um mögliche Probleme zu definieren.

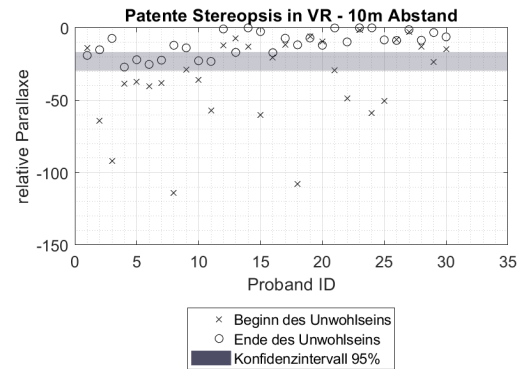


Abbildung 5.4: Relative Parallaxen der Grenzen der patenten Stereopsis, Hintergrund in 10m Abstand, bereinigter Datensatz

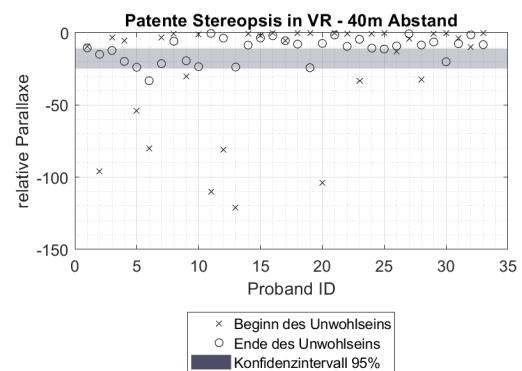


Abbildung 5.5: Relative Parallaxen der Grenzen der patenten Stereopsis, Hintergrund in 40m Abstand, bereinigter Datensatz

Während die Tests von Shibata, Kim, Hoffman und Banks im natürlichen Sehen stattfanden, finden die Tests in der VR-Umgebung durch Verwenden von Unity statt. Da davon ausgegangen wurde, dass Unity tatsächlich ein metrisches System nutzt, kann von einem Vergleich beider Arbeiten ausgegangen werden. Zudem ist es nicht bekannt, in welchem Abstand das Display zum Auge durch die Linsen projiziert wird. Somit lassen sich nicht die genauen Distanzen für Akkommodation und Vergenz des Auges bestimmen.

Shibata, Kim, Hoffmann, Banks beziehen sich auf eine sogenannte "Prozent-Regel" die besagt, dass

die Kreuz-Disparitäten 2-3% der Bildschirmbreite nicht überschreiten dürfen.¹⁰ In diesem Fall hat die HTC Vive eine Bildschirmbreite von 1080 Pixel. Somit wären das -22 bis -32 Pixel relative Parallaxe. Dieser Bereich deckt sich mit unseren Messwerten.

Abschließend können aus den erfassten Daten zwei Regeln für S3D-Inhalte in VR-Anwendungen wie folgt definiert werden:

- Um Konflikte der patenten Stereopsis zu vermeiden, darf zwischen Hintergrund und Vordergrund höchstens eine relative Parallaxe von -20 bis -30 Pixeln bestehen.
- Um Konflikte der okulomotorischen Stereopsis zu vermeiden, darf die absolute Parallaxe eines Objektes nicht unterhalb von -90 Pixeln liegen.

(vgl. Abb. 5.6)

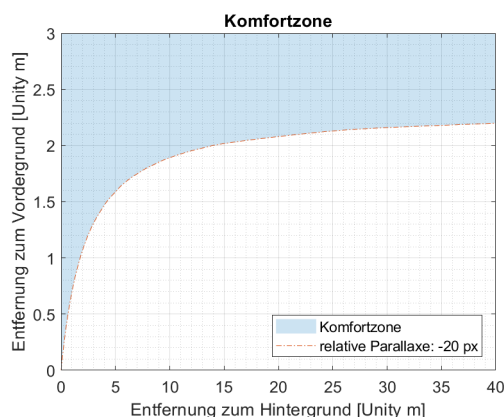


Abbildung 5.6: Verhältnis der Entfernung des Hintergrundes zur Entfernung des Vordergrundes sowie die daraus resultierende Komfortzone. Entfernungen sind nur bei unserem Setup gültig

Fazit

Die Entwicklung von VR-Anwendungen, die dem Nutzer ein komfortables Erlebnis bezüglich okulomotorischer und patenten Stereopsis bieten

sollen, ähneln derzeit aufgrund der mangelnden Forschung eher einem Prinzip, welches auf Erfahrung und Ausprobieren basiert.

Mithilfe dieser empirischen Untersuchung wird nachgewiesen, dass die Ergebnisse von Shibata, Kim, Hoffman und Banks nicht nur im Raum des natürlichen Sehens, sondern auch im Bereich VR anwendbar sind.

Somit ergeben sich Richtlinien, an welche sich Entwickler von VR-Anwendungen halten können, um ihrem Anwender ein angenehmes VR-Erlebnis zu ermöglichen.

Anhang

Messdaten, als .CSV

Referenzen

- Takashi Shibata, Joohwan Kim, David M. Hoffman, Martin S. Banks
The zone of comfort: Predicting visual discomfort with stereo displays
Journal of Vision (2011) 11(8):11, 1-29
- Fry, G. (1939). Further experiments on the accommodative convergence relationship. American Journal of Optometry, 16, 325–334.
- M. Millidot, Dictionary of Optometry and Visual Science, 5th edition, Butterworth-Heinemann, 2000, ISBN 0–7506–4373–0
- Thorn, Alan. 2017. *Mastering Unity 5.x. Create amazing games with solid gameplay features, using a professional-grade workflow inside the Unity engine!* Birmingham, UK: Packt Publishing.

¹⁰ Shibata, Kim, Hoffman, Banks (2011, S.24)