

# Auswerten der Anzeigetreue und der Interaktionstreue in einem Virtual Reality-Spiel

Ryan P. McMahan, Doug A. Bowman, David J. Zielinski und Rachael B. Brady

**Abstrakt** - In den letzten Jahren haben Verbraucher eine technologische Revolution erlebt, die durch hochauflösende, stereoskopische Fernseher und natürliche, gestenbasierte Videospielkonsolen realistischere Erlebnisse in ihren eigenen vier Wänden ermöglicht hat. Obwohl diese Erlebnisse realistischer sind und ein höheres Maß an Wiedergabetreue bieten, ist nicht klar, wie sich die erhöhten Anzeige- und Interaktionsaspekte der Wiedergabetreue auf das Benutzererlebnis auswirken. Da wir mit immersiver virtueller Realität (VR) sehr hohe Wiedergabetreue erzielen können, haben wir eine Studie entworfen und durchgeführt, in der eine sechsseitige CAVE verwendet wurde, um die Wiedergabetreue und die Interaktionstreue unabhängig voneinander bei extrem hohen und niedrigen Werten für eine VR zu bewerten -person shooter (FPS) Spiel. Unser Ziel war es, die Auswirkungen der Wiedergabetreue auf den Benutzer in einem komplexen, leistungsintensiven Kontext besser zu verstehen. Die Ergebnisse unserer Studie zeigen, dass sowohl die Wiedergabetreue als auch die Interaktionstreue die Strategie und Leistung sowie die subjektive Beurteilung von Präsenz, Engagement und Benutzerfreundlichkeit erheblich beeinflussen. Insbesondere waren die Leistungsergebnisse stark für zwei Bedingungen: geringe Wiedergabetreue bei geringer Interaktion (repräsentativ für traditionelle FPS-Spiele) und hohe Wiedergabetreue bei hoher Anzeige (ähnlich wie in der realen Welt).

**Indexbegriffe** - Virtuelle Realität, Wiedergabetreue, Interaktionstreue, Präsenz, Engagement.

## 1 I. EINLEITUNG

In den letzten zehn Jahren haben fortschrittliche Technologien den Verbrauchern durch ein höheres Maß an Wiedergabetreue realistischere Erfahrungen ermöglicht (der objektive Grad an Genauigkeit, mit dem reale Erfahrungen und Effekte von einem Computersystem reproduziert werden [1]). Größere Displays, höhere Auflösungen, schnellere Bildwiederholraten und stereoskopische Funktionen haben die Leistung erhöht *Wiedergabetreue anzeigen* (der objektive Grad an Genauigkeit, mit dem reale sensorische Reize reproduziert werden) von Heimfernsehern. In ähnlicher Weise hat die neueste Generation von Videospielsystemen (z. B. Nintendo Wii und Xbox Kinect) mit ihren natürlichen, gestenbasierten Interaktionen ein höheres Maß an Leistung erbracht *Interaktionstreue* (den objektiven Genauigkeitsgrad, mit dem reale Interaktionen reproduziert werden können). Trotz der Popularität dieser technologischen Fortschritte ist nicht ganz klar, wie sich eine erhöhte Wiedergabetreue und Interaktionstreue auf das Benutzererlebnis der Verbraucher auswirken.

In der Virtual Reality (VR) -Community haben Forscher die Auswirkungen einer Erhöhung der Wiedergabetreue durch Studien untersucht *Eintauchen*. Slater et al. Definierte Immersion als „Beschreibung einer Technologie“ und diskutierte, wie Anzeigequalitäten und Interaktionszuordnungen die Wiedergabetreue eines Systems beeinflussen [2]. Im Gegensatz dazu definierten Bowman und McMahan das Eintauchen als „das objektive Maß an sensorischer Wiedergabetreue, das ein VR-System bietet“ und schlossen Interaktionen von ihrer Definition aus [3]. Zusätzlich haben einige Forscher den Begriff „Eintauchen“ synonym mit „Präsenz“ (dem psychologischen Gefühl, „da zu sein“ [2]) verwendet. Um Verwirrung aufgrund dieser inkompatiblen Verwendung des Begriffs „Eintauchen“ zu vermeiden und weil sich unsere Arbeit auf die Auswirkungen des Wiedergabetreffens eines Systems konzentriert (ähnlich den ersten beiden Definitionen oben), verwenden wir anstelle des Begriffs „Wiedergabetreue“ den Begriff „Wiedergabetreue“ *Eintauchen*.“ Darüber hinaus behaupten wir, dass das allgemeine Maß an Wiedergabetreue von einer Vielzahl von Systemmerkmalen herrührt, und dass ein tiefes Verständnis der Treue eine kontrollierte Bewertung der Auswirkungen dieser verschiedenen Aspekte der Treue erfordert. Zu diesem Zweck unterscheiden wir zwischen Anzeigetreue (sensorischer Realismus) und Interaktionstreue (Aktionsrealismus).

Einige VR-Forscher haben die Wiedergabetreue bewertet, indem sie VR-Systeme mit hoher Wiedergabetreue mit Desktop-Systemen mit niedriger Wiedergabetreue verglichen haben. Zum Beispiel verglich Gruchalla CAVE [4] und Desktop-Versionen einer Well-Path-Planungsanwendung und stellte fest, dass Benutzer mit der höheren Wiedergabetreue des CAVE-Systems [5] eine deutlich schnellere Leistung erbrachten. Ebenso Arns et al. fanden heraus, dass eine CAVE-Version einer statistischen Datenanwendung die Genauigkeit im Vergleich zu einer Desktop-Version signifikant verbesserte [6]. Rötzel et al. verglich ein Head-Mounted Display (HMD) mit einem Desktop zum Navigieren in virtuellen Umgebungen (VEs) in großem Maßstab und stellte fest, dass die erhöhte Wiedergabetreue des HMD es Benutzern ermöglichte, die VEs erheblich schneller zu navigieren [7]. In diesen und vielen anderen früheren Studien zu den Auswirkungen der Wiedergabetreue wurden jedoch die Wiedergabetreue und die Interaktionstreue verwechselt, was es schwierig machte, die Komponenten zu unterscheiden, die zu signifikanten Effekten beitragen.

In Anbetracht der Wichtigkeit, die Auswirkungen einer Erhöhung der Wiedergabetreue weiter zu untersuchen, haben wir eine Studie entworfen und durchgeführt, um sowohl die Wiedergabetreue als auch die Interaktionstreue bei extrem hohen und niedrigen Werten unabhängig voneinander zu bewerten. Dies ergab vier experimentelle Bedingungen. Wir haben eine sechsseitige CAVE mit drahtlosen Tracking-Funktionen verwendet, um ein extrem hohes Maß an Anzeige- und Interaktionstreue zu gewährleisten. Um ein besseres Verständnis der Auswirkungen der Wiedergabetreue auf die Benutzererfahrung, insbesondere auf die Leistung, zu erhalten, haben wir uns für ein Virtual-Reality-Ego-Shooter-Spiel (FPS) als komplexen, leistungsintensiven Kontext für unsere Studie entschieden. Wir haben auch die Auswirkungen der Wiedergabetreue auf subjektive Reaktionen wie Präsenz [8], Engagement [9] und Benutzerfreundlichkeit bewertet.

Nachdem wir die Details unseres experimentellen Designs beschrieben haben, liefern wir Analysen der Ergebnisse unserer Studie, die darauf hinweisen, dass sowohl die Wiedergabetreue als auch die Interaktionstreue signifikante Auswirkungen auf die Benutzererfahrung haben. Wir diskutieren, wie Leistungsergebnisse zwei der vier Bedingungen stark begünstigen - Low-Display, Low-Interaction-Fidelity und High-Display, High-Interaction-Fidelity -, die beide vertraute Erfahrungen nutzen (dh ein traditionelles FPS-Spiel bzw. die reale Welt). Insgesamt trägt unsere Studie zu einem besseren wissenschaftlichen Verständnis der Auswirkungen von Anzeigetreue und Interaktionstreue bei und berücksichtigt gleichzeitig einige praktische Probleme bei der Auswahl geeigneter Anzeigen und Interaktionstechniken.

## 2 R. BEGESTERT W. ORK

Zusätzlich zu den zuvor erwähnten praktischen Bewertungen der Wiedergabetreue, bei denen kontrastierende Systeme verglichen wurden [5-7], haben Forscher auch bestimmte Komponenten der Wiedergabetreue bewertet. Es wurde gezeigt, dass Stereoskopie Zeit und Fehler bei der Pfadverfolgung erheblich reduziert

- Ryan P. McMahan ist bei Virginia Tech, E-Mail: rymcmaha@vt.edu.
- Doug A. Bowman ist bei Virginia Tech, E-Mail: bowman@vt.edu.
- David J. Zielinski ist bei der Duke University, E-Mail: djzielin@duke.edu.
- Rachael B. Brady ist bei der Duke University, E-Mail: rbrady@duke.edu.

Manuskript erhalten am 15. September 2011; akzeptiert 3. Januar 2012; online gestellt am 4. März 2012; verschickt am 27. Februar 2012.

Informationen zum Erhalt von Nachdrucken dieses Artikels erhalten Sie per E-Mail an: tvcg@computer.org.

Aufgaben [10], zusätzlich zur Verbesserung der Benutzerleistung für Aufgaben zum räumlichen Verständnis [11]. Es hat sich gezeigt, dass ein vergrößertes Sichtfeld (FOV) die Benutzerleistung für Suchaufgaben [12, 13], Vergleichsaufgaben [13] und Gehaufgaben [12] erheblich verbessert. Größere Anzeigegrößen [14] und schnellere Bildraten [15] haben auch zu einer besseren Benutzerleistung für bestimmte Arten von Aufgaben geführt.

Neben Komponenten der Anzeigetreue haben Forscher auch spezifische Interaktionsaspekte bewertet. Pausch *et al.* verglich die natürliche Kopfverfolgung mit der handbasierten Blickwinkelsteuerung und stellte fest, dass die Interaktion mit höherer Wiedergabetreue die Benutzerleistung bei der Suche nach nicht vorhandenen Zielen verbesserte [16]. In ähnlicher Weise wurde gezeigt, dass Interaktionstechniken mit höheren Freiheitsgraden (DOF) Techniken übertreffen, die auf 2-DOF-Eingaben (z. B. einer Maus) für 3D-Objektmanipulationen [17] und Rotationen [18] basieren. Andererseits wurde gezeigt, dass High-Fidelity-Lenktechniken die Benutzerleistung im Vergleich zu Joystick-basierten Low-Fidelity-Techniken erheblich reduzieren [19].

Über die Bewertung einzelner Aspekte der Wiedergabetreue hinaus haben einige Forscher systematische, multivariate Bewertungen der Wiedergabetreue durchgeführt. Stereoskopie (eine Komponente der Anzeigetreue) und Kopfverfolgung (eine Komponente der Interaktionstreue) wurden in mehreren Studien zusammen bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass beide signifikante Auswirkungen auf räumliche Verständnisaufgaben haben [20, 21], aber nicht unbedingt auf Objektmanipulationsaufgaben [20]. 22, 23]. Das Betrachtungsfeld (FOR), die Gesamtgröße des den Benutzer umgebenden Gesichtsfeldes (in Grad des Sichtwinkels) [3], wurde zusammen mit verschiedenen Interaktionsaspekten, einschließlich Kopfverfolgung [24] und 3D-Manipulationstechniken [25], systematisch bewertet [26], wurde jedoch in diesen Studien nicht als statistisch signifikanter Faktor nachgewiesen.

Die meisten früheren multivariaten Bewertungen der Wiedergabetreue waren durch die verwendeten VR-Systeme mit niedrigem und mittlerem Bereich begrenzt, die weniger als ein vollständiges 360-Grad-FOR boten. Dies könnte der Grund sein, warum FOR kein wesentlicher Faktor ist. Darüber hinaus untersuchten die meisten dieser Experimente nur eine einzelne Aufgabe isoliert und sammelten nur Leistungsmetriken wie Geschwindigkeit und Genauigkeit.

### 3 E. XPERIMENT

Das Ziel unseres Experiments war es, die unabhängigen und kombinierten Effekte von Anzeigetreue und Interaktionstreue zu bewerten. Um die Einschränkungen der vorherigen Arbeiten zu beseitigen, haben wir beschlossen, eine systematische, multivariate Bewertung unter Verwendung eines VR-Systems durchzuführen, das ein vollständiges 360-Grad-FOR bietet. Wir haben uns auch dafür entschieden, die Wiedergabetreue im Kontext einer leistungsintensiven Anwendung mit einer Vielzahl von Benutzeraufgaben zu untersuchen und Daten zu vielen Aspekten der Benutzererfahrung zu sammeln.

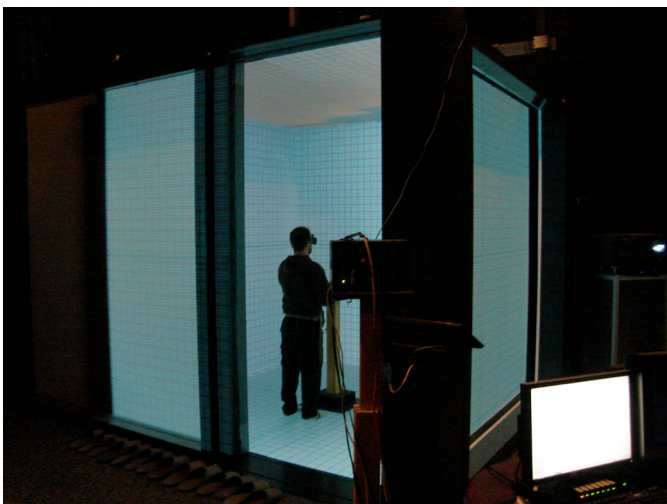


Abb. 1. Wir haben eine sechsseitige CAVE verwendet, um die unabhängigen und kombinierten Effekte von Anzeigetreue und Interaktionstreue zu bewerten.

### 3.1 Gerät

Um extrem hohe und niedrige Wiedergabetreue zu bewerten, verwendeten wir eine sechsseitige CAVE (siehe Abb. 1), die ein vollständiges 360-Grad-FOR bot. Dieses von hinten projizierte, würfelförmige Anzeigesystem hatte eine Größe von 3 x 3 x 3 m und eine Bildschirmauflösung von 1050 x 1050 Pixel auf jedem Bildschirm. Die CrystalEyes-Technologie wurde für die aktive Stereoskopie verwendet. Wir haben Syzygy [26] verwendet, um das Master / Slave-Framework des Systems zu steuern, das aus einem Master-Node-Computer und sechs unterstützenden Computern (einer pro Bildschirm) bestand.

Wir haben das in CAVE integrierte drahtlose InterSense IS-900-Tracking-System mit einem 6-DOF-Head-Tracker und einem 6-DOF-Stab verwendet, um Eingaben für ein hohes Maß an Interaktionstreue bereitzustellen. Wir haben auch eine Bluetooth-Maus mit drei Tasten und eine Bluetooth-Standardtastatur für unsere geringe Interaktionsgenauigkeit verwendet. Wir stellen beide auf ein 106 cm hohes Podium, das mit einem Plattenteller mit einem Durchmesser von 46 cm ausgestattet ist, um mit diesen Eingabegeräten mit niedriger Wiedergabetreue ein physisches Drehen zu ermöglichen. Wir haben eine konstante, moderate Mausempfindlichkeit beibehalten, um eine Variabilität zwischen unseren Teilnehmern zu vermeiden. Die Mauslatenz war wahrscheinlich geringer als die Zauberstablatenz, aber keine Teilnehmer äußerten sich zu diesem Unterschied, und wir glauben nicht, dass dies die Ergebnisse beeinflusst.

### 3.2 Experimentelles Design

Wir wollten sowohl die Anzeige- als auch die Interaktionstreue auf sehr hohem und sehr niedrigem Niveau bewerten. Um die experimentelle Kontrolle zu erhöhen und die Verwechslungen zwischen den hohen und niedrigen Werten zu verringern, haben wir einen systematischen Ansatz gewählt, der ein CAVE-System verwendet, um Verwechslungen zu kontrollieren und gleichzeitig bestimmte Komponenten der Wiedergabetreue zu untersuchen [3]. Beide unabhängigen Variablen - Anzeigetreue und Interaktionstreue - hatten zwei Ebenen und wurden innerhalb der Probanden variiert. Die Darstellungsreihenfolge der vier Bedingungen wurde zwischen den Probanden ausgeglichen.

#### 3.2.1 Komponenten von Interesse

Aus Gründen der Wiedergabetreue haben wir uns entschlossen, die Komponenten Stereoskopie und FOR zu bewerten und gleichzeitig andere Komponenten wie FOV, Auflösung und Bildrate zu steuern. Wir haben uns für die Bewertung der Stereoskopie entschieden, da sich gezeigt hat, dass dies ein wesentlicher Faktor in früheren Forschungen ist [10, 11]. Da wir für unser Experiment eine sechsseitige CAVE verwendeten, entschieden wir uns auch für die Bewertung von FOR, die in VR-Systemen mit niedrigerem FOR nicht oft signifikante Effekte gezeigt hatte [24, 25]. Für unsere hohe Wiedergabetreue wurden daher stereoskopische Grafiken und ein vollständiges 360-Grad-FOR (dh alle sechs Seiten der CAVE) verwendet. Im Gegensatz dazu umfasste unsere geringe Wiedergabetreue nicht stereoskopische Grafiken und nur ein 90-Grad-FOR (dh eine einzelne Wand der CAVE).

Für die Interaktionstreue haben wir uns entschlossen, uns auf die beiden wichtigsten FPS-Interaktionen zu konzentrieren - Zielen und Fortbewegung, um andere Interaktionen wie Hocken und Aufnehmen von Objekten zu entfernen. Zum Zielen haben wir uns entschieden, eine traditionelle FPS-Maustechnik mit natürlichem 3D-Zeigen zu vergleichen, indem wir den 6-DOF-Handstab mit seiner ergonomischen Auslösetaste verwendeten. Für die Fortbewegung wollten wir eine traditionelle FPS-Tastaturtechnik mit einer natürlicheren High-Fidelity-Fortbewegungstechnik vergleichen. Zu diesem Zweck haben wir eine neue Technik entworfen und implementiert (siehe Abschnitt 3.2.2). Für unsere hohe Interaktionsgenauigkeit würden Benutzer daher mit dem Handheld-Controller zielen und feuern, während sie sich physisch bewegen, um virtuell zu reisen. Im Gegensatz dazu würden Benutzer für unsere geringe Interaktionsgenauigkeit die Maus verwenden, um zu drehen, zu zielen,

#### Die menschliche Joystick-Technik

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, wollten wir eine Tastaturtechnik mit einer natürlicheren High-Fidelity-Fortbewegungstechnik vergleichen. Leider war echtes Gehen [27] - die Fortbewegungstechnik mit der höchsten Wiedergabetreue - nicht möglich, da die Benutzer auf den von unserem CAVE-System bereitgestellten Platz 3.2.2 beschränkt waren und unser FPS-Spiel einen viel größeren virtuellen Raum umfassen würde. Aus ähnlichen Gründen war das umgeleitete Gehen [28] für unser CAVE-basiertes FPS nicht praktikabel. Wir haben verschiedene Techniken für das Gehen an Ort und Stelle in Betracht gezogen, die von der Kopfverfolgung [2] über die Beinverfolgung [29] bis zum Schattengehen reichen

Technik [30]. Wir haben uns jedoch für unsere High-Fidelity-Fortbewegungstechnik entschieden, um Ermüdungserscheinungen und Typ-I-Fehler zu vermeiden (wenn das System beurteilt, dass Benutzer an Ort und Stelle gehen, wenn sie nicht [27] sind), da dies leistungsintensiv ist unser FPS-Kontext.

Daher haben wir eine Technik entwickelt, die dem Navigationsparadigma von Bourdot und Touraine [31] ähnelt *menschlicher Joystick*. Indem wir den horizontalen 2D-Vektor von der Mitte der CAVE bis zur verfolgten Kopfposition des Benutzers erfassen und ihn als 2D-Vektor eines Joysticks für die Fortbewegung verwenden, haben wir den Benutzer im Wesentlichen in einen riesigen menschlichen Joystick verwandelt (siehe Abb. 2). Da nur die Kopfposition des Benutzers zur Berechnung des Vektors verwendet wird, hat die Richtung, in die der Benutzer blickt, keinen Einfluss auf die Fortbewegung. Dies macht den menschlichen Joystick zu einer omnidirektionalen Fortbewegungstechnik, die Bewegungen in jede horizontale Richtung ermöglicht.

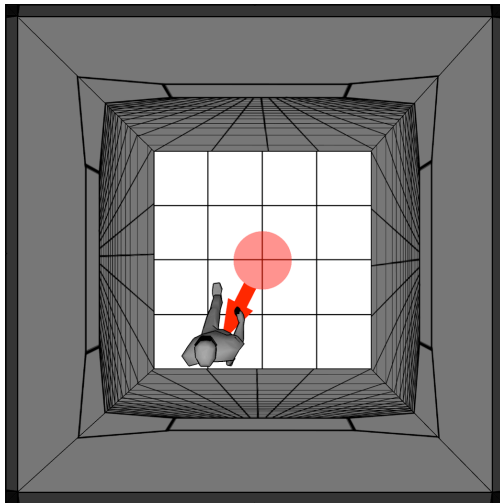


Abb. 2. Top-down-Darstellung der CAVE mit einer großen virtuellen Umgebung. Die menschliche Joystick-Technik verwendet die verfolgte Kopfposition des Benutzers von der Mitte der CAVE für die virtuelle Fortbewegung, da der 2D-Vektor eines Joysticks verwendet würde.

Um eine ständige virtuelle Fortbewegung aufgrund kleiner Abstände zwischen der Kopfposition des Benutzers und der Mitte der CAVE zu vermeiden, haben wir auch eine „neutrale Zone“ mit einem Radius von 20 cm in der Mitte der CAVE eingefügt. In der neutralen Zone bietet die Eins-zu-Eins-Kopfverfolgung dem Benutzer die Möglichkeit, geringfügige Änderungen am Ansichtspunkt vorzunehmen, z. B. um eine Ecke zu spähen. Sobald Sie sich außerhalb der neutralen Zone befinden, wird die menschliche Joystick-Technik aktiviert und der Benutzer wird virtuell übersetzt. Die Geschwindigkeit der virtuellen Fortbewegung hängt linear von der Entfernung des Benutzers von der neutralen Zone ab. Die maximale Geschwindigkeit beträgt 5 cm pro Bild in der Nähe der Wände der CAVE, was der maximalen Geschwindigkeit unserer Tastaturtechnik entspricht.

Nach einer informellen Usability-Studie des menschlichen Joysticks haben wir ihn als unsere High-Fidelity-Fortbewegungstechnik für unser Experiment übernommen. Darüber hinaus haben wir uns entschlossen, eine kleine Bodenmatte in der Mitte der CAVE zu positionieren, um eine haptische Darstellung der neutralen Zone zu ermöglichen, was besonders bei Bedingungen mit geringer Wiedergabetreue ohne Bodenprojektion wichtig wäre.

### 3.2.3 Details der experimentellen Bedingungen

In diesem Abschnitt diskutieren wir die Details unserer vier Bedingungen innerhalb der Subjekte und stellen Probleme fest, die mit der gleichzeitigen Bewertung der Wiedergabe- und Interaktionstreue auf hohen und niedrigen Ebenen verbunden sind.

**High-Display, High-Interaction (HDHI):** Diese Bedingung war die einfachste Kombination eines Niveaus der Anzeigetreur mit einem Grad der Interaktionstreue. Umgeben von sechs stereoskopischen CAVE-Seiten bewegt sich der Benutzer mithilfe der menschlichen Joystick-Technik virtuell durch die Welt, während er mit dem 6-DOF-Stab das Fadenkreuz der Waffe in die 3D-Umgebung richtet (siehe Abb. 3). Aufgrund des 360-Grad-FOR machte der Benutzer einfach physische Körperdrehungen, um sich zu drehen (dh den Blickwinkel zu drehen).

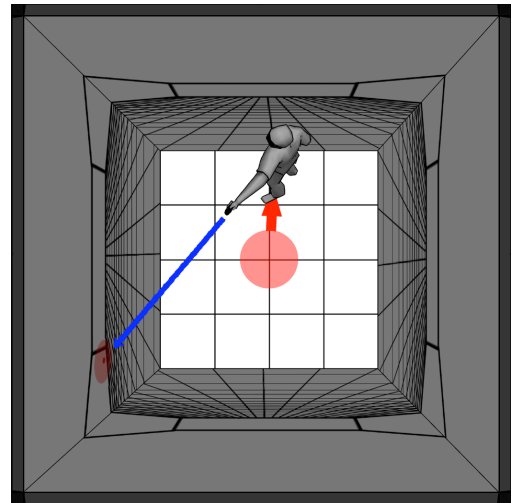


Abb. 3. Im HDHI-Zustand (High-Display, High-Interaction) verwendete der Benutzer die menschliche Joystick-Technik für die virtuelle Fortbewegung und einen 6-DOF-Stab, um das Fadenkreuz für das 3D-Zielen und Schießen auf alle sechs Seiten der CAVE zu steuern.

**High-Display, Low-Interaction (HDLI):** In den meisten FPS-Spielen bleibt das Fadenkreuz auf dem Bildschirm zentriert, während die Maus den Blickwinkel des Spielers dreht, um in verschiedene Richtungen zu zielen, einschließlich nach oben und unten. Dies war aus zwei Gründen keine praktikable Lösung für diesen Zustand. Erstens würde die Fähigkeit, das VE nach oben und unten zu neigen, desorientiert werden, da der Benutzer physisch im Raum stehen würde und manchmal parallel zum virtuellen Boden schweben könnte. Zweitens ist bekannt, dass virtuelle Rotationen bei manchen Menschen Simulatorkrankheit verursachen [32], und konstante virtuelle Rotationen würden wahrscheinlich dazu führen, dass viele Benutzer krank werden. Um dies zu beheben, haben wir die Maus so konzipiert, dass sie die Bewegung des Fadenkreuzes über die umgebenden Bildschirme steuert, ähnlich einem Cursor auf einem Desktop mit mehreren Monitoren, außer ohne Grenzen und kontinuierliche Funktionen.

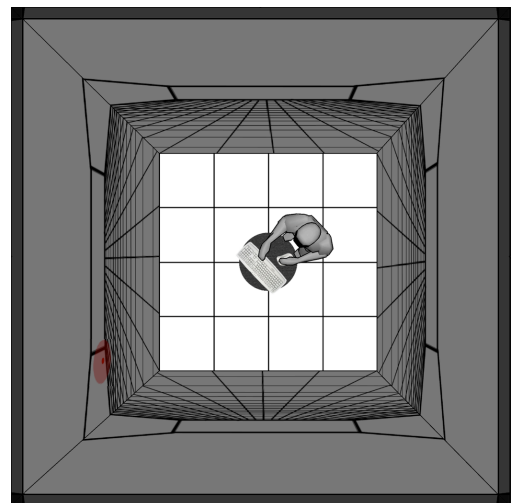


Abb. 4. Im HDLI-Zustand (High-Display, Low-Interaction) verwendete der Benutzer die Tastatur für die virtuelle Fortbewegung und die Maus zum Zielen und Schießen auf alle sechs Seiten der CAVE.

Eine Frage, die sich aus dieser Wahl ergab, war, in welche Richtung sich die Tastaturbewegungstasten ausrichten würden. Bei einem einzelnen Bildschirm ist es intuitiv, dass der Aufwärtspfeil oder die W-Taste einer Bewegung in Richtung des Bildschirms zugeordnet werden. Bei umgebenden Bildschirmen ist es jedoch wenig sinnvoll, diese Befehle immer der Bewegung in Richtung der „vorderen“ Wand der CAVE zuzuordnen, da Benutzer ständig auf verschiedene Bildschirme schauen. Stattdessen interpretierten wir Tastaturbefehle relativ zur horizontalen 2D-Richtung des Fadenkreuzes von der Mitte des

**HÖHLE.** Wenn der Spieler das Fadenkreuz an der rechten Wand der HÖHLE positioniert, aktivieren der Aufwärtspfeil und die W-Taste die Bewegung nach rechts anstatt nach vorne. Wir haben unser Podium mit dem Plattenteller ausgestattet, damit der Benutzer jederzeit vor dem Fadenkreuz stehen kann.

Daher bewege der Benutzer, wie in Fig. 4 der HDLI-Bedingung dargestellt, die Maus, um das Fadenkreuz zwischen den sechs stereoskopischen CAVE-Seiten zu bewegen, wobei er sich vermutlich gleichzeitig mit dem Drehteller physisch drehte, um dem Fadenkreuz zugewandt zu sein, während er den Pfeil oder WASD verwendete Tasten, um sich relativ dazu zu bewegen.

**Low-Display, High-Interaction (LDHI):** Dieser Zustand war dem HDLI-Zustand sehr ähnlich, außer dass physische Körperrotationen aufgrund des reduzierten FOR nicht mehr ausreichten, um sich zu drehen, um den Rest der Umgebung zu sehen. Stattdessen mussten wir eine Technik für bereitstellen *virtuelles Drehen*. In vielen CAVE-Anwendungen wird der Joystick des Zauberstabs verwendet, um das virtuelle Drehen zu ermöglichen. Für dieses Experiment haben wir dies jedoch aus zwei Gründen nicht als geeignete Technik angesehen. Erstens wurde die Anzahl der physischen Aktionen erhöht, die der Benutzer für eine vollständige Interaktion benötigt, wodurch die kognitive Belastung des Benutzers erhöht wird. Zweitens würde der Zustand mit geringer Anzeige und geringer Interaktion die Stabvorrichtung nicht verwenden, und daher würde das virtuelle Drehen zwischen diesen beiden Zuständen verwechselt.

Vor diesem Hintergrund haben wir beschlossen, das virtuelle Drehen zu aktivieren, wenn sich das Fadenkreuz innerhalb von fünf Grad vom linken und rechten Rand der einzelnen CAVE-Wand bewegt. Die aktivierende Kante bestimmte die Drehrichtung, während die Rotationsgeschwindigkeit linear mit dem Abstand zwischen dem Fadenkreuz und der Kante in Beziehung stand, mit einer maximalen Rotationsgeschwindigkeit von 2,5 Grad, sobald sich das Fadenkreuz an der Kante oder außerhalb des Bildschirms befand.

Wie in Fig. 5 zu sehen ist, benutzte der Benutzer immer noch die menschliche Joystick-Technik, um sich in jede Richtung durch die Welt zu bewegen, während er den Zauberstab auf die vordere CAVE-Wand richtete. Das virtuelle Drehen wurde bereitgestellt, indem das Fadenkreuz in die Nähe oder von den Rändern des Bildschirms gerichtet wurde. Die Grafiken waren nicht stereoskopisch und die Projektoren für die anderen CAVE-Seiten wurden geschlossen, um das reduzierte FOR zu erstellen.

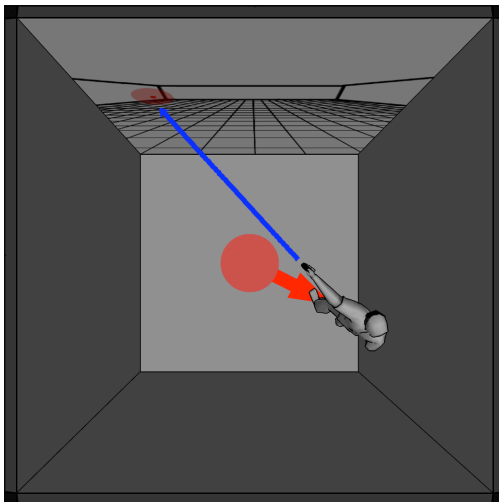


Abb. 5. Im LDHI-Zustand (Low-Display, High-Interaction) verwendete der Benutzer die menschliche Joystick-Technik für die virtuelle Fortbewegung und einen 6-DOF-Stab zum 3D-Zielen und Schießen auf die Vorderwand der CAVE.

**Low-Display, Low-Interaction (LDLI):** Wie beim HDLI Bedingung: Wir haben die Maus im LDLI-Zustand entworfen, um die Bewegung des Fadenkreuzes zu steuern, mit der Ausnahme, dass das Fadenkreuz wie im LDHI-Zustand auch das virtuelle Drehen aktiviert, wenn es sich in der Nähe oder hinter dem linken und rechten Rand der vorderen CAVE-Wand befindet. Wie in Abb. 6 dargestellt, bewegte der Benutzer das Fadenkreuz mit der Maus an der vorderen CAVE-Wand, drehte sich virtuell, indem er das Fadenkreuz vom Bildschirm wegbewegte, und bewegte sich mit den Pfeiltasten oder den WASD-Tasten relativ zum Fadenkreuz. Für diesen Zustand waren die Grafiken nicht stereoskopisch und die anderen Projektoren waren geschlossen.

### 3.3 Ego-Shooter-Aufgabe

Wie bereits erwähnt, haben wir für den Kontext unseres Experiments ein Ego-Shooter-Spiel ausgewählt. Die meisten FPS-Spiele erfordern komplexe Interaktionen, z. B. das Manövrieren um Hindernisse beim Schießen auf Feinde. Diese komplexen Interaktionen sind leistungsintensiv und erfordern ein hohes Maß an peripherem Bewusstsein und räumlichem Verständnis, um Feinden und Hindernissen auszuweichen. Wir haben daher erwartet, dass unser FPS-Kontext ein größeres Potenzial für signifikante Unterschiede bietet, insbesondere im Hinblick auf den Grad der Interaktionstreue.

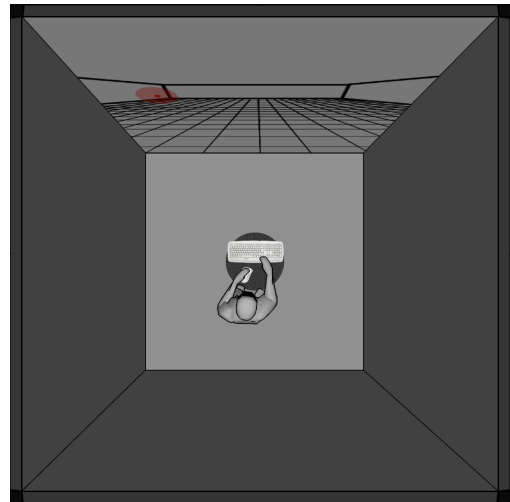


Abb. 6. Im LDLI-Zustand (Low Display, Low Interaction) verwendete der Benutzer die Tastatur für die virtuelle Fortbewegung und die Maus zum Zielen und Schießen auf die Vorderwand der CAVE.

Nachdem wir verschiedene Open-Source-FPS-Engines untersucht hatten, verwendeten wir schließlich Syzygys Quake III Arena-Kartenbetrachter namens „Cubecake“. Um die experimentelle Kontrolle aufrechtzuerhalten, haben wir unsere eigenen Routinen für künstliche Intelligenz (KI) entwickelt, unsere eigenen Karten entworfen und verschiedene Spielerstatistiken verfolgt. Da FPS-Spiele oft als von Natur aus gewalttätig angesehen werden und von einigen als Feindseligkeit und Aggressivität angesehen werden [33], haben wir uns für leblose „Androiden“ als Bots (dh Feinde) entschieden und Spezialeffekte wie Blut vermieden, um die emotionalen Risiken von zu verringern teilnehmen. Unter allen Bedingungen lief unser FPS-Spiel mit durchschnittlich 55 Bildern pro Sekunde.

Um während unseres Experiments mehr Kontrolle zu behalten, haben wir uns entschieden, einfache Karten mit nur einem Pfad von Anfang bis Ende zu verwenden, anstatt weitläufige Karten mit mehreren Routen zur Auswahl zu verwenden. Insbesondere wollten wir diese linearen Layouts verwenden, um mehr über unsere interessierenden Komponenten (Stereoskopie, FOR, Zielen und Fortbewegung) zu erfahren, indem wir Kartenabschnitte entwerfen, die diese Komponenten einzeln und in Kombination ausführen. Um Stereoskopie zu üben, haben wir uns dafür entschieden, dass Bots innerhalb von drei Metern um den Player erscheinen (oder „teleportieren“), da Stereoskopie bei engen Betrachtungsabständen effektiver ist [34]. Um ein erhöhtes FOR zu erreichen, haben wir uns entschlossen, Bots in viele verschiedene Richtungen um den Standort des Spielers teleportieren zu lassen. Zum Zielen hatten wir mehrere Bots gleichzeitig teleportiert, um die Fähigkeit zu betonen, Ziele schnell zu ändern. Schließlich zur Fortbewegung,

Es gab insgesamt zehn Kartenabschnitte mit jeweils unterschiedlichen Zwecken. Um den Zweck jedes Abschnitts trotz der Bewegungen und Aktionen der Spieler beizubehalten, haben wir „Computer Station“-Spielelemente entwickelt, die die Spieler „hacken“ mussten (dh in der Nähe stehen). Diese Elemente ermöglichten es uns, die Position der Spieler zu kontrollieren, wenn Bots auftauchten. In jedem Abschnitt mussten die Spieler acht Bots eliminieren, bevor der Eingang zum nächsten Abschnitt geöffnet wurde. Wir haben auch Sektionseingänge als Respawn-Orte verwendet, wenn Spieler innerhalb der Sektion gestorben sind. In der folgenden Liste wird der Zweck jedes Kartenabschnitts mit einer kurzen Beschreibung beschrieben.



1. **Keiner:** Bots teleportieren sich nacheinander, mehr als 6 m entfernt in einer einzelnen Richtung.
2. **Stereoskopie:** Bots teleportieren sich nacheinander innerhalb von 3 m in eine einzelne Richtung.
3. **ZUM:** Bots teleportieren sich nacheinander, mehr als 6 m entfernt in einer umgebenden Mode.
4. **Zielen:** Alle acht Bots teleportieren sich auf einmal, mehr als 6 m in eine Richtung weg.
5. **Fortbewegung:** Bots teleportieren sich nacheinander, mehr als 6 m in eine Richtung weg und zurückziehen, wenn getroffen.
6. **Stereoskopie + Fortbewegung:** Bots teleportieren sich einzeln, innerhalb von 3 m in eine Richtung und ziehen Sie sich zurück, wenn Sie getroffen werden.
7. **FÜR + Fortbewegung:** Bots teleportieren sich nacheinander, mehr als 6 m entfernt in der Umgebung und ziehen Sie sich zurück, wenn Sie getroffen werden.
8. **Stereoskopie + Ziel:** Alle acht Bots teleportieren sich gleichzeitig hinein, innerhalb von 3 m in eine Richtung.
9. **FOR + Ziel:** Alle acht Bots teleportieren sich gleichzeitig mehr als 6 m entfernt in einer umgebenden Weise.
10. **Stereoskopie + FÜR + Zielen + Fortbewegung:** Alle acht Bots sofort innerhalb von 3 m in der Umgebung teleportieren und sich zurückziehen, wenn sie getroffen werden.

### 3.4 User Experience-Metriken

In Bezug auf die Auswirkungen der Anzeige- und Interaktionstreue auf die Benutzererfahrung haben wir eine breite Palette von Metriken gesammelt, die sich auf die objektive Benutzerleistung und subjektive Beurteilungen von Präsenz, Engagement und Benutzerfreundlichkeit beziehen. Für die Benutzerleistung haben wir mehrere objektive Metriken pro Abschnitt gemessen: Fertigstellungszeit, erlittener Schaden, Genauigkeit und Anzahl der Kopfschüsse. Wir haben die Anzahl der Todesfälle durch Feinde nicht erfasst, da in jedem Abschnitt acht Bots eliminiert wurden.

Um die Wahrnehmung der Präsenz zu messen, haben wir nach jeder Bedingung den Slater-Usoh-Steed (SUS)-Präsenz-Fragebogen [8] verabreicht. In ähnlicher Weise verwendeten wir zur Messung des Engagements nach jeder Bedingung einen modifizierten Fragebogen zum Spielengagement (GEQ) [9] (siehe Anhang A). Aus Gründen der Benutzerfreundlichkeit und Präferenzen haben wir einen eigenen Fragebogen zur Benutzerfreundlichkeit entwickelt, der aus sieben Punkten der Likert-Skala besteht und den wir auch nach jeder Bedingung verwaltet haben (siehe Anhang B).

### 3.5 Verfahren

Nach der Einstellung musste jeder Teilnehmer ein Einverständniserklärung unterschreiben und eine Hintergrundumfrage ausfüllen, in der neben allgemeinen demografischen Informationen auch Daten zu seinen Spiel- und Schusswaffenerfahrungen gesammelt wurden. Nach der Hintergrunduntersuchung haben wir einen räumlichen Orientierungstest [35] durchgeführt, um die räumlichen Fähigkeiten unserer Teilnehmer zu analysieren.

In der nächsten Phase des Verfahrens erlebte jeder Teilnehmer fünf Minuten lang eine High-Fidelity-VR-Simulation einer Küche. In früheren VR-Studien mit Leistungsaufgaben hatten wir beobachtet, dass Teilnehmer bei anfänglichen Aufgaben schlecht abschnitten, weil sie von der High-Fidelity-VR fasziniert waren. Daher hofften wir, dass diese VR-Exposition diese „Wow-Faktor“-Situationen beseitigen würde.

Nach der VR-Expositionsphase durchliefen die Teilnehmer die vier experimentellen Bedingungen in der Reihenfolge ihrer zugewiesenen Permutation. Wir begannen jede Bedingung mit einer Trainingseinheit, in der der Experimentator erklärte, wie er in der gegebenen Bedingung interagieren sollte, und dem Teilnehmer erlaubte, mit einer kleinen Karte mit fünf Abschnitten und Bots zu üben. Nach dem Training wurden die Teilnehmer angewiesen, so schnell wie möglich eine Karte mit zehn Abschnitten durchzuspielen, wobei Schäden vermieden und eine hohe Genauigkeit beibehalten wurden. Anschließend gaben wir dem Teilnehmer die Fragebögen zu Präsenz, Engagement und Benutzerfreundlichkeit. Die Teilnahme endete nach der vierten Bedingung und dauerte ungefähr 120 Minuten, einschließlich geplanter Pausen.

### 3.6 Teilnehmer

Um die Reihenfolgeeffekte auszugleichen, haben wir 24 unbezahlte Teilnehmer (23 Männer, 1 Frau) rekrutiert, einen für jede Permutation der vier Bedingungen. Ein 25. Teilnehmer wurde rekrutiert, gab jedoch während des Experiments wegen Simulatorkrankheit auf, was der einzige Fall in irgendeinem Ausmaß war

Simulatorkrankheit während der Studie beobachtet. Die Altersspanne der 24 Teilnehmer lag zwischen 18 und 26 Jahren mit einem Durchschnittsalter von 20 Jahren. Unter Verwendung ihrer Hintergrundumfragedaten berechneten wir für jeden Teilnehmer einen FPS-Expertise-Score, indem wir die Anzahl der Stunden addierten, die sie in der Woche zuvor FPS-Spiele gespielt hatten zur Teilnahme die durchschnittliche Anzahl der Stunden, die sie FPS-Spiele pro Woche gespielt haben, und die Anzahl der FPS-Spiele, die sie jemals abgeschlossen oder „geschlagen“ haben. Diese Berechnungen ergaben Expertise-Scores im Bereich von 0 bis 33 mit einem Mittelwert von 12,69. Wir haben diese Scores während der Analyse verwendet, um festzustellen, ob das FPS-Fachwissen einen signifikanten Einfluss auf unsere Ergebnisse hatte.

## 4 R. ERGEBNISSE

### 4.1 Objektive Metriken

Für die Gesamtabschlusszeiten führten wir eine Zwei-Wege-ANOVA mit wiederholten Messungen durch und stellten fest, dass weder die Wiedergabetreue noch die Interaktionstreue einen signifikanten Haupteffekt hatten, sondern dass zwischen beiden eine signifikante Interaktion bestand ( $F(1, 23) = 82,3503$ ,  $p < 0,0001$ ). Ein Post-hoc-Vergleich unter Verwendung des Tukey-HSD-Tests ergab, dass die LDLI- und HDHI-Bedingungen signifikant schneller waren als die LDHI- und HDLI-Bedingungen (siehe 7).

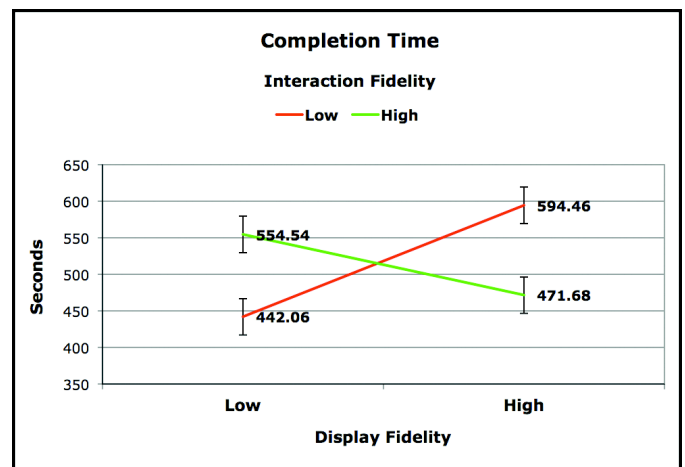


Abb. 7. Die LDLI- und HDHI-Bedingungen waren für die Abschlusszeit signifikant schneller als die beiden Bedingungen mit gemischter Wiedergabetreue.

Für den erlittenen Gesamtschaden führten wir eine weitere Zwei-Wege-ANOVA mit wiederholten Messungen durch und stellten fest, dass der Grad der Interaktionstreue einen signifikanten Effekt hatte ( $F(1, 23) = 71,2675$ ,  $p < 0,0001$ ), wobei eine hohe Interaktion besser abschnitt als geringe Interaktion. Die Wiedergabetreue hatte keinen signifikanten Effekt, obwohl eine signifikante Wechselwirkung zwischen den beiden Variablen bestand ( $F(1, 23) = 62,0083$ ,  $p < 0,0001$ ). Basierend auf einem Tukey-HSD-Post-hoc-Test war der HDHI-Zustand signifikant der beste und der HDLI-Zustand signifikant der schlechteste, während sich die beiden Bedingungen mit niedriger Anzeige nicht signifikant voneinander unterschieden (siehe 8).

Für die Gesamtgenauigkeit zeigte eine weitere Zwei-Wege-ANOVA mit wiederholten Messungen, dass sowohl die Wiedergabetreue als auch die Interaktionstreue signifikante Auswirkungen hatten. Für die Wiedergabetreue ( $F(1, 23) = 10,0048$ ,  $p = 0,0043$ ), niedrige Anzeige ( $M = 48,18\%$ ) lieferte eine signifikant bessere Genauigkeit als hohe Anzeige ( $M = 45,13\%$ ). In ähnlicher Weise ist für die Interaktionstreue ( $F(1, 23) = 14,3572$ ,  $p = 0,0009$ ) eine geringe Interaktion ( $M = 49,60\%$ ) war signifikant genauer als eine hohe Wechselwirkung ( $M = 43,72\%$ ). Aus Gründen der Genauigkeit gab es keine signifikante Wechselwirkung zwischen den beiden Aspekten der Wiedergabetreue.

In Bezug auf die Gesamtzahl der Headshots fanden wir keinen signifikanten Effekt der Anzeigetreue oder der Interaktionstreue, basierend auf einer anderen Zwei-Faktor-ANOVA. Darüber hinaus gab es keine signifikante Wechselwirkung zwischen den beiden.

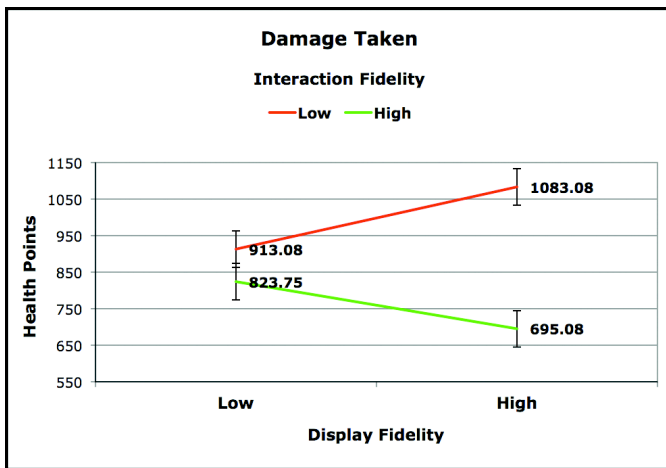


Abb. 8. Der HDHI-Zustand war signifikant am besten, um Schäden zu vermeiden, während der HDLI-Zustand signifikant am schlechtesten war.

Um festzustellen, ob die Stereoskopie in unserem Experiment wahrscheinlich einen signifikanten Effekt hatte, führten wir Einweg-ANOVAs (Display Fidelity) mit wiederholten Messungen an den objektiven Metriken durch, die aus den entworfenen Kartenabschnitten (2, 6, 8 und 10) gesammelt wurden Stereoskopie ausüben. Die Wiedergabetreue hatte für keine der vier Metriken einen signifikanten Effekt. Im Gegensatz dazu führten wir Einweg-ANOVAs (Display Fidelity) mit wiederholten Messungen in den FOR-Abschnitten (3, 7, 9 und 10) durch und stellten fest, dass die Display Fidelity signifikante Auswirkungen auf die Abschlusszeiten hatte ( $F(1, 23) = 34,3228$ ,  $p < 0,0001$ ), erlittener Schaden ( $F(1, 23) = 6,5804$ ,  $p = 0,0173$ ) und Genauigkeit ( $F(1, 23) = 21,8265$ ,  $p = 0,0001$ ), wobei eine hohe Anzeige signifikant schlechter abschneidet als eine niedrige Anzeige in alle Fälle.

In ähnlicher Weise führten wir Einweg-ANOVAs (Interaction Fidelity) mit wiederholten Messungen für die objektiven Metriken durch, die in den Abschnitten zur Ausübung des Ziels (4, 8, 9 und 10) gesammelt wurden, und stellten fest, dass die Interaktionstreue signifikante Auswirkungen auf die Abschlusszeiten hatte ( $F(1, 23) = 4,7341$ ,  $p = 0,0401$ ) und erlittener Schaden ( $F(1, 23) = 33,8057$ ,  $p < 0,0001$ ), wobei eine hohe Interaktion in beiden Fällen signifikant besser abschneidet als eine niedrige Interaktion. In den Fortbewegungsabschnitten (5, 6, 7 und 10) stellten wir fest, dass die Interaktionstreue signifikante Auswirkungen auf den erlittenen Schaden ( $F(1, 23) = 48,7039$ ,  $p < 0,0001$ ) und die Genauigkeit ( $F(1, 23) = 5,8290$ ,  $p = 0,0241$ ), wobei eine hohe Wechselwirkung eine bessere Leistung zur Vermeidung von Schäden, aber eine schlechtere Leistung für ein genaues Brennen aufweist.

Um festzustellen, ob der Hintergrund der Teilnehmer signifikante Auswirkungen auf unsere Ergebnisse hatte, haben wir Pearson-Korrelationskoeffizienten berechnet, um die Beziehungen zwischen unseren objektiven Metriken und den räumlichen Fähigkeiten der Teilnehmer, dem FPS-Fachwissen und dem Fachwissen über Schusswaffen zu bewerten. Wir fanden eine positive Korrelation zwischen der räumlichen Fähigkeit und der Anzahl der Kopfschüsse ( $r = 0,3750$ ,  $p = 0,0002$ ), aber eine negative Korrelation zwischen der räumlichen Fähigkeit und der Gesamtgenauigkeit ( $r = -0,2241$ ,  $p = 0,0282$ ). Wir fanden auch eine positive Korrelation zwischen dem Fachwissen über Schusswaffen und den gesamten Kopfschüssen ( $r = 0,3050$ ,  $p = 0,0025$ ). Interessanterweise fanden wir keine Korrelationen zwischen der FPS-Expertise der Teilnehmer und unseren objektiven Metriken.

## 4.2 Subjektive Metriken

Für die Anwesenheit führten wir eine Zwei-Wege-ANOVA mit wiederholten Messungen (Anzeigetreue und Interaktionstreue) durch und stellten fest, dass beide Variablen einen signifikanten Einfluss auf die SUS-Anwesenheitswerte hatten. Für die Wiedergabetreue ( $F(1, 23) = 27,4669$ ,  $p < 0,0001$ ), hohe Anzeige ( $M = 2,7500$ ) lieferte signifikant mehr Präsenz als eine niedrige Anzeige ( $M = 1,3333$ ). Ähnliches gilt für die Interaktionstreue ( $F(1, 23) = 41,9552$ ,  $p < 0,0001$ ) lieferte das hohe Interaktionsniveau ( $M = 3,0000$ ) signifikant mehr Präsenz als das niedrige Niveau ( $M = 1,0833$ ). Es gab eine signifikante Wechselwirkung zwischen unseren beiden Variablen für das Vorhandensein ( $F(1, 23) = 28,2273$ ,  $p < 0,0001$ ). Basierend auf einem Tukey-HSD-Post-hoc-Test lieferte die HDHI-Bedingung signifikant mehr Präsenz als die anderen drei Bedingungen.

Für das Engagement führten wir eine weitere Zwei-Wege-ANOVA mit wiederholten Messungen durch und stellten fest, dass beide die Wiedergabetreue anzeigen ( $F(1, 23) = 16,4229$ ,  $p = 0,0005$ ) und Interaktionstreue ( $F(1, 23) = 37,8723$ ,  $p < 0,0001$ ) hatten signifikante Auswirkungen auf die modifizierten GEQ-Scores. Eine hohe Anzeige ( $M = 47,7917$ ) beschäftigte die Teilnehmer signifikant mehr als eine niedrige Anzeige ( $M = 43,3958$ ), und die hohe Interaktion ( $M = 49,7708$ ) lieferte signifikant mehr Engagement als die niedrige Anzeige ( $M = 41,4167$ ). Wieder gab es eine signifikante Wechselwirkung zwischen unseren beiden Variablen für das Engagement ( $F(1, 23) = 9,5299$ ,  $p = 0,0052$ ). Ein Post-hoc-Vergleich unter Verwendung des Tukey-HSD-Tests ergab, dass der HDHI-Zustand als beurteilt wurde

Für die Usability-Beurteilungen zeigte eine weitere Zwei-Wege-ANOVA mit wiederholten Messungen, dass beide die Wiedergabetreue anzeigen ( $F(1, 23) = 4,4756$ ,  $p = 0,0454$ ) und Interaktionstreue ( $F(1, 23) = 38,0305$ ,  $p < 0,0001$ ) hatten signifikante Auswirkungen auf die Gesamt-Usability-Scores. Die Teilnehmer bewerteten eine hohe Anzeige ( $M = 59,5000$ ) als signifikant besser verwendbar als eine niedrige Anzeige ( $M = 56,2292$ ), und die hohe Interaktion ( $M = 62,9583$ ) wurde als signifikant besser verwendbar als eine niedrige Interaktion ( $M = 52,7708$ ) beurteilt. Es gab eine signifikante Wechselwirkung zwischen den beiden Variablen ( $F(1, 23) = 70,3930$ ,  $p < 0,0001$ ). Ein Post-hoc-Vergleich unter Verwendung des Tukey-HSD-Tests ergab, dass die HDHI-Bedingung als signifikant besser verwendbar beurteilt wurde als die anderen drei Bedingungen.

## 5 D. ISCUSSION

Basierend auf den Ergebnissen, unseren Beobachtungen und den Kommentaren der Teilnehmer haben wir vier Schlussfolgerungen aus unserer systematischen Bewertung der Anzeige- und Interaktionstreue gezogen.

### 5.1 Von der Wiedergabetreue beeinflusste Strategie

Während unserer Studie stellten wir fest, dass sowohl die Wiedergabetreue als auch die Interaktionstreue die Strategien unserer Teilnehmer zu beeinflussen schienen. Abhängig von der Wiedergabetreue wechselten die Benutzer zwischen zwei Strategien zum Schießen auf Ziele. Unter den Bedingungen mit hoher Anzeige sprühten die meisten Teilnehmer Schüsse, während sie das Fadenkreuz auf einen Feind zu bewegten (den Teilnehmern wurde eine unbegrenzte Menge Munition gegeben). Unter Bedingungen mit geringer Anzeige stellten die Teilnehmer das Fadenkreuz jedoch normalerweise vor dem Schießen mit dem Feind in einer Reihe auf. Der signifikante Effekt der Anzeigetreue auf die Gesamtgenauigkeit stützt diese Beobachtungen, da eine niedrige Anzeigetreue genauer war als eine hohe Anzeigetreue. Eine wichtige Überlegung zu diesen beobachteten Strategien ist, dass unter den Bedingungen mit hoher Anzeige

Wir beobachteten einen ähnlichen Unterschied in den Strategien zur Interaktionstreue. Unter Bedingungen mit hoher Interaktion bewegten sich die Teilnehmer tendenziell mehr mit der menschlichen Joystick-Technik als mit der Tastaturtechnik unter Bedingungen mit geringer Interaktion. Dieser Unterschied in den Strategien führte dazu, dass die Teilnehmer weniger Schaden nahmen und bei hoher Interaktionstreue weniger genau waren, während sie mehr Schaden nahmen und bei niedriger Interaktionstreue genauer waren. Unsere Analysen bezüglich des erlittenen Schadens und der Gesamtgenauigkeit stützten diese beiden Beobachtungen. Eine mögliche Erklärung für diese Auswahlmöglichkeiten in Strategien ist, dass die menschliche Joystick-Technik eine physische Bewegung zurück in die neutrale Zone erfordert, um eine aktuelle virtuelle Bewegung zu stoppen, während die Tastaturtechnik nur erfordert, dass der Benutzer das Drücken des Pfeils oder der WASD-Tasten stoppt.

### 5.2 Vertrautheit Verbesserte Leistung

Eine wichtige Lehre aus unserer systematischen Bewertung der Wiedergabetreue ist, dass die Vertrautheit die Benutzerleistung verbessert. Obwohl es sich um die beiden extremen Kombinationen von Anzeige- und Interaktionstreue handelt und trotz unterschiedlicher Benutzerstrategien, übertrafen die LDLI- und HDHI-Bedingungen die beiden anderen Bedingungen mit gemischter Wiedergabetreue in Bezug auf unsere objektiven Metriken. Für die Abschlusszeiten waren beide Bedingungen signifikant schneller als LDLI und HDLI

Bedingungen. Bei den erlittenen Schäden übertraf der HDHI-Zustand die anderen deutlich. In ähnlicher Weise lieferte die LDLI-Bedingung die beste Genauigkeit aufgrund ihrer Kombination aus geringer Anzeige und geringer Interaktion, die beide hinsichtlich der Genauigkeit signifikant besser waren als ihre höheren Gegenstücke. Wir haben diese Ergebnisse gesehen, obwohl die Teilnehmer unter den jeweiligen Bedingungen geschult und geübt wurden, bevor die eigentlichen Versuche abgeschlossen wurden.

Basierend auf unseren Beobachtungen und Kommentaren der Teilnehmer führen wir die hervorragende Leistung der LDLI- und HDHI-Bedingungen auf Vertrautheit zurück. Konzeptionell war die LDLI-Bedingung einem Standard-Desktop-FPS-Spiel sehr ähnlich, bei dem die Teilnehmer eine Maus und eine Tastatur verwendeten, um mit einem niedrigen FOR zu interagieren (obwohl Desktop-Spiele normalerweise Software-FOVs verwenden, die sich vom physischen FOV des Displays unterscheiden). Mehrere Teilnehmer bemerkten, dass diese Bedingung sie an das Spielen eines Desktop-FPS erinnerte. Der HDHI-Zustand ähnelte der Interaktion in der realen Welt. Von den Teilnehmern wurde erwartet, dass sie den 6-DOF-Zauberstab wie eine echte Waffe halten und richten. Sie drehten sich physisch in verschiedene Richtungen in der virtuellen Welt und erhielten durch die Verwendung der menschlichen Joystick-Technik eine gewisse physische Fortbewegung.

Im Gegensatz dazu ist es schwierig, Analogien zwischen den beiden gemischten Bedingungen und allem, was Benutzer kennen, zu ziehen. Zum Beispiel ist die HDLI-Bedingung ungewöhnlich, da die meisten High-End-Anzeigesysteme über Funktionen verfügen, um Interaktionen mit höherer Wiedergabetreue über Tracking-Systeme bereitzustellen. Es könnte geringfügige Ähnlichkeiten zwischen dem LDHI-Zustand und einigen aktuellen bewegungsgesteuerten Videospielsystemen geben, was erklären würde, warum es besser lief als der HDLI-Zustand. Insbesondere die Fähigkeit, physisch auf ein Ziel zu zeigen, ist in vielen neueren Videospielen zu finden, aber die Fähigkeit, sich gleichzeitig physisch zu bewegen, ist weniger verbreitet.

### 5.3 High Fidelity Erhöhte Präsenz, Engagement und Benutzerfreundlichkeit

Unsere Studie zeigte auch, dass ein hohes Maß an Wiedergabetreue oder Interaktionstreue die positiven subjektiven Reaktionen der Benutzer auf das VR-System erhöhte. In Bezug auf Präsenz, Engagement und Benutzerfreundlichkeit stellten wir fest, dass sowohl die Wiedergabetreue als auch die Interaktionstreue signifikante positive Auswirkungen hatten. Noch wichtiger ist, dass die Benutzer das größte Gefühl für Präsenz, Engagement und Benutzerfreundlichkeit mit der Bedingung hoher Anzeige und hoher Interaktion hatten. Designer, die ein hohes Maß an Präsenz, Engagement oder Benutzerfreundlichkeit erreichen möchten, sollten berücksichtigen, dass ein höheres Maß an Wiedergabetreue am besten geeignet ist. Insbesondere scheinen hohe Niveaus sowohl der Wiedergabetreue als auch der Interaktionstreue zu kombinieren, um die besten Ergebnisse zu erzielen.

### 5.4 Die Auswirkungen von Wiedergabetreuekomponenten wurden nuanciert

Trotz früherer Studien, die die signifikanten Auswirkungen der Stereoskopie belegen [10, 11], deuten die Ergebnisse unserer Bewertung darauf hin, dass die Stereoskopie keinen signifikanten Einfluss auf unsere FPS-Aufgabe hatte. Obwohl wir speziell Kartenabschnitte entworfen haben, um diese Komponente für die Wiedergabetreue auszuführen, haben wir in diesen Abschnitten keine signifikanten Auswirkungen der Wiedergabetreue auf die Leistung festgestellt. Der wahrscheinlichste Grund dafür liegt in der Art der FPS-Zielaufgabe. Unabhängig von der Interaktionsgenauigkeit positioniert ein Benutzer ein immer sichtbares Fadenkreuz auf einem Ziel in Menschengröße und schießt dann weiter. Wenn das Ziel weit vom Benutzer entfernt ist, hat die Stereoskopie natürlich keinen signifikanten Effekt, aber selbst wenn sich das Ziel innerhalb von 3 m befindet, erscheint das Ziel zum Zielen viel größer und eine Stereoskopie ist nicht erforderlich.

Andererseits fanden wir Hinweise darauf, dass eine Komponente der Anzeigetruhe (FOR) und Komponenten der Interaktionstreue (Ziel- und Fortbewegungsrealismus) signifikante Auswirkungen auf die Leistung hatten. Obwohl wir weitere Bewertungen benötigen, um diese Effekte im Detail zu verstehen, können wir daraus schließen, dass die Einflüsse der Anzeige- und Interaktionstreuekomponenten nicht universell sind, sondern subtile Nuancen aufweisen. Sie hängen wahrscheinlich vom spezifischen Anwendungskontext, den Aufgaben, Benutzerstrategien und der Wiedergabetreue ab.

## 6 C. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND F. UTURE W. ORK

Obwohl die Verbraucher in den letzten Jahren eine technologische Revolution erlebt haben, die auf realistischere Erfahrungen ausgerichtet ist, haben wir gezeigt, dass es noch viel zu lernen gibt, wie sich die Erhöhung der Treue eines Systems zur realen Welt auswirkt. Mithilfe einer sechsseitigen CAVE und eines leistungsintensiven FPS-Spiels haben wir systematisch extrem hohe und niedrige Anzeige- und Interaktionstreue-Werte bewertet, um ein besseres Verständnis ihrer Auswirkungen auf die Benutzererfahrung zu erhalten.

Die Ergebnisse unserer Studie zeigen, dass der Grad der Anzeige- und Interaktionstreue wichtige Faktoren für die Bestimmung von Leistung, Präsenz, Engagement und Benutzerfreundlichkeit sein kann. In Kombination mit den in der Literatur vorhandenen Ergebnissen haben wir auf zwei wichtige Arten zum allgemeinen Verständnis der Auswirkungen der Wiedergabetreue beigetragen. Erstens haben wir gezeigt, dass eine erhöhte Wiedergabetreue häufig positive Auswirkungen auf die Benutzererfahrung haben kann (der negative Effekt der Wiedergabetreue auf die Genauigkeit in diesem Experiment scheint auf den Einfluss der Anzeige auf die Benutzerstrategie zurückzuführen zu sein). Zweitens kann die Kombination aus Anzeigetruhe und Interaktionstreue die Vertrautheit des Gesamtsystems bestimmen, und diese Vertrautheit scheint in vielen Fällen die Gesamtleistung zu bestimmen.

Für zukünftige Arbeiten planen wir zusätzliche systematische Bewertungen der Anzeige- und Interaktionstreue. Insbesondere planen wir, FOR, Ziel und Fortbewegung unabhängig voneinander im selben FPS-Kontext zu untersuchen, da diese interessierenden Komponenten potenziell signifikante Auswirkungen auf die Ergebnisse dieser Bewertung hatten. Angesichts unserer Entdeckung, dass die Wiedergabetreue die Benutzerstrategie beeinflusst, planen wir außerdem, einige Studien zu einzelnen FPS-Unteraufgaben durchzuführen, um die durch unterschiedliche Strategien verursachte Varianz zu verringern und mehr über die Auswirkungen der Wiedergabetreue auf die Benutzerleistung zu erfahren. Wir werden diese zukünftigen Studien und die Ergebnisse dieser Studie verwenden, um Richtlinien zu erstellen, die Designern helfen, Anzeigen und Interaktionstechniken mit angemessener Wiedergabetreue basierend auf der gewünschten Benutzererfahrung auszuwählen.

## EIN PPENDIX A: M. ODIFIED E. NGAGEMENT Q. UESTIONNAIRE

Anleitung: Bitte bewerten Sie für jede der folgenden Situationen Ihre Sensationserfahrung während des Spiels auf der folgenden Skala von 1 (nicht erlebt) bis 5 (definitiv erlebt).

1. Ich habe die Zeit aus den Augen verloren.
2. Die Dinge schienen automatisch zu passieren.
3. Ich fühlte mich anders.
4. Ich hatte Angst.
5. Das Spiel fühlte sich echt an.
6. Ich fühlte mich angespannt.
7. Die Zeit schien still zu stehen oder anzuhalten.
8. Ich fühlte mich meiner Umgebung nicht bewusst.
9. Das Spielen schien automatisch zu sein.
10. Meine Gedanken waren schnell.
11. Ich habe vergessen, dass ich mich in einer virtuellen Umgebung befand.
12. Ich habe gespielt, ohne darüber nachzudenken, wie ich spielen soll.
13. Durch das Spielen fühlte ich mich ruhig.
14. Ich habe mich wirklich mit dem Spiel beschäftigt.
15. Ich wollte nicht aufhören zu spielen.

## EIN PPENDIX B: U. SABILITY Q. UESTIONNAIRE

1. Bewerten Sie, wie einfach es für Sie war, nach Androiden zu suchen (1 = extrem schwierig, 7 = extrem einfach).
2. Bewerten Sie, wie einfach es für Sie war, zu schießen und die Androiden zu treffen.
3. Bewerten Sie, wie einfach es für Sie war, sich auf dem Raumschiff zu bewegen.
4. Bewerten Sie, wie einfach es für Sie war, nahe Objekte von fernen Objekten zu unterscheiden.
5. Bewerten Sie, wie einfach es für Sie war, das Spiel im Allgemeinen zu spielen.
6. Bewerten Sie, wie natürlich es für Sie war, nach Androiden zu suchen (1 = extrem unnatürlich, 7 = extrem natürlich).
7. Bewerten Sie, wie natürlich es für Sie war, zu feuern und die Androiden zu treffen.

8. Bewerten Sie, wie natürlich es für Sie war, sich auf dem Raumschiff zu bewegen.
9. Bewerten Sie, wie natürlich es für Sie war, nahe Objekte von fernen Objekten zu unterscheiden.
10. Bewerten Sie, wie natürlich es für Sie war, das Spiel im Allgemeinen zu spielen. Bewerten Sie, wie viel Spaß Sie beim Spielen hatten (1 = extrem frustrierend, 7 = extrem lustig).
11. Bewerten Sie, wie anstrengend es für Sie war, das Spiel zu spielen (1 = extrem anstrengend, 7 = überhaupt nicht anstrengend).

## EIN BESTÄTIGUNGEN

Die Autoren bedanken sich bei ihren Teilnehmern. Diese Arbeit wurde teilweise durch ein Stipendium des Office of Naval Research unterstützt.

## R. EFERENZEN

- [1] S.J. Gerathwohl, "Genauigkeit der Simulation und Übertragung der Ausbildung: Eine Überprüfung des Problems", Bundesamt für Luftfahrtverwaltung, Bericht der Luftfahrtbehörde, 1969.
- [2] M. Slater, M. Usoh und A. Steed, "Schritte unternehmen: Der Einfluss einer Gehteknik auf die Präsenz in der virtuellen Realität". *ACM-Transaktionen zur Computer-Mensch-Interaktion (TOCHI)*, vol. 2, nein. 3, S. 201-219, 1995.
- [3] DA Bowman und RP McMahan, "Virtuelle Realität: Wie viel Eintauchen ist genug?" *IEEE Computer*, vol. 40, nein. 7, S. 36-43, 2007.
- [4] C. Cruz-Neira, DJ Sandin und TA DeFanti, "Surround-Screen-Projektions-basierte virtuelle Realität: Das Design und die Implementierung der CAVE" *Vorträge der Jahreskonferenz über Computergrafik und interaktive Techniken (SIGGRAPH)*, S. 135-142, 1993.
- [5] K. Gruchalla, "Immersive Well-Path Editing: Untersuchung des Mehrwerts des Eintauchens", *Verfahren der IEEE Virtual Reality (VR)*, S. 157-164, 2004.
- [6] L. Arns, D. Cook und C. Cruz-Neira, "Die Vorteile der statistischen Visualisierung in einer immersiven Umgebung", *Verfahren der IEEE Virtual Reality (VR)*, S. 88-95, 1999.
- [7] RA Ruddle, SJ Payne und DM Jones, "Navigieren in großen virtuellen Umgebungen: Welche Unterschiede treten zwischen am Helm montierten und auf dem Schreibtisch angezeigten Display auf?" *Präsenz: Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen*, vol. 8, nein. 2, S. 157-168, 1999.
- [8] M. Slater, M. Usoh und A. Steed, "Tiefe der Präsenz in virtuellen Umgebungen", *Präsenz: Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen*, vol. 3, nein. 2, S. 130-144, 1994.
- [9] JH Brockmyer, CM Fox, KA Curtiss, E. McBroom, KM Burkhart und JN Pidruzny, "Die Entwicklung des Fragebogens zum Spielengagement: Ein Maß für das Engagement beim Spielen von Videospielen". *Zeitschrift für experimentelle Sozialpsychologie*, vol. 45, nein. 4, S. 624-634, 2009.
- [10] C. Ware und P. Mitchell, "Neubewertung von Stereo- und Bewegungshinweisen zur dreidimensionalen Visualisierung von Graphen", *Vorträge des Symposiums zur angewandten Wahrnehmung in Grafik und Visualisierung (APGV)*, S. 51-58, 2005.
- [11] Y.-Y. Yeh und LD Silverstein, "Räumliche Urteile mit monoskopischer und stereoskopischer Darstellung perspektivischer Darstellungen", *Mensch Faktoren*, vol. 34, nein. 5, S. 583-600, 1992.
- [12] KW Arthur, "Auswirkungen des Sichtfelds auf die Leistung mit Head-Mounted Displays", Doktor der Philosophie, Informatik, Universität von North Carolina, Chapel Hill, 2000.
- [13] R. Ball und C. North, "Auswirkungen der hochauflösenden gekachelten Anzeige auf grundlegende Visualisierungs- und Navigationsaufgaben", *Proceedings of Extended Abstracts zu Human Factors in Computersystemen (CHI EA)*, S. 1196-1199, 2005.
- [14] DS Tan, D. Gergle, P. Scupelli und R. Pausch, "Mit ähnlichen visuellen Winkeln verbessern größere Anzeigen die räumliche Leistung." *Tagungsband zu Human Factors in Computersystemen (CHI)*, S. 217-224, 2003.
- [15] C. Ware und R. Balakrishnan, "Erreichen von Objekten in VR-Displays: Verzögerung und Bildrate", *ACM-Transaktionen zur Computer-Mensch-Interaktion (TOCHI)*, vol. 1, nein. 4, S. 331-356, 1994.
- [16] R. Pausch, D. Proffitt und G. Williams, "Quantifying Immersion in Virtuelle Realität," *Vorträge der Jahreskonferenz über Computergrafik und interaktive Techniken (SIGGRAPH)*, S. 13-18, 1997. [17] C. Ware und DR Jessome, "Using the Bat: A Six-Dimensional Mouse für die Objektplatzierung " *IEEE-Computergrafik und -Anwendungen*, vol. 8, nein. 6, S. 65-70, 1988.
- [18] K. Hinckley, J. Tullio, R. Pausch, D. Proffitt und N. Kassell, "Usability Analyse von 3D-Rotationstechniken, " *Vorträge des ACM-Symposiums zu Software und Technologie für Benutzeroberflächen (UIST)*, S. 1-10, 1997.
- [19] RP McMahan, AJD Alon, S. Lazem, RJ Beaton, D. Machaj, M. Schäfer, MG Silva, A. Leal, R. Hagan und DA Bowman, "Bewertung natürlicher Interaktionstechniken in Videospielen", *Vorträge des IEEE-Symposiums zu 3D-Benutzeroberflächen (3DUI)*, S. 11-14, 2010.
- [20] KW Arthur, KS Booth und C. Ware, "Evaluating 3D Task" Leistung für virtuelle Aquarienwelten " *ACM-Transaktionen auf Informationssystemen (TOIS)*, vol. 11, nein. 3, S. 239-265, 1993.
- [21] C. Ware und G. Franck, "Evaluating Stereo and Motion Cues for Visualisierung von Informationsnetzen in drei Dimensionen " *ACM-Transaktionen auf Grafiken (TOG)*, vol. 15, nein. 2, S. 121-140, 1996.
- [22] M. Narayan, L. Waugh, X. Zhang, P. Bafna und DA Bowman, "Quantifizierung der Vorteile des Eintauchens für die Zusammenarbeit in virtuellen Umgebungen" *Vorträge des ACM-Symposiums zu Virtual Reality-Software und -Technologie (VRST)*, S. 78-81, 2005.
- [23] W. Barfield, C. Hendrix und K.-E. Bystrom, "Visualisierung der Struktur von virtuellen Objekten unter Verwendung von Head Tracked Stereoscopic Displays " *Proceedings of Virtual Reality Jährliches Internationales Symposium (VRAIS)*, S. 114-120, 1997.
- [24] D. Raja, DA Bowman, J. Lucas und C. North, "Exploring the Benefits" des Eintauchens in die Visualisierung abstrakter Informationen " in *8. Internationaler Workshop für immersive Projektionstechnologie*, 2004.
- [25] RP McMahan, D. Gorton, J. Gresock, W. McConnell und DA Bowman, "Trennung der Auswirkungen von Immersionsgrad und 3D-Interaktionstechniken", *Vorträge des ACM-Symposiums zu Virtual Reality-Software und -Technologie (VRST)*, S. 108-111, 2006.
- [26] B. Schaeffer und C. Goudeseune, "Syzygy: Native PC Cluster VR", *Verfahren der IEEE Virtual Reality (VR)*, S. 15-22, 2003.
- [27] M. Usoh, KW Arthur, MC Whittton, R. Bastos, A. Steed, M. Slater, und FP Brooks, "Walking> Walking-in-Place> Fliegen in virtuellen Umgebungen" *Vorträge der Jahreskonferenz über Computergrafik und interaktive Techniken (SIGGRAPH)*, S. 359-364, 1999. [28] S. Razzaque, "Redirected Walking", Doktor der Philosophie, Universität von North Carolina in Chapel Hill, 2005.
- [29] JN Templeman, PS Denbrook und LE Sibert, "Virtual Locomotion: An Ort und Stelle durch virtuelle Umgebungen gehen " *Gegenwart: Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen*, vol. 8, nein. 6, S. 598-617, 1999.
- [30] DJ Zielinski, RP McMahan und RB Brady, "Shadow Walking: an Unbelastete Fortbewegungstechnik für Systeme mit Unterflurprojektion " *Verfahren der IEEE Virtual Reality (VR)*, S. 167-170, 2011.
- [31] P. Bourdot und D. Touraine, "Polyvalent Display Framework to Control virtuelle Navigation durch 6DOF-Tracking " *Verfahren der IEEE Virtual Reality (VR)*, S. 277-278, 2002.
- [32] RHY So und WT Lo, "Cybersickness: Eine experimentelle Studie zu Isolieren Sie die Auswirkungen von Rotationsszenenoszillationen. " *Verfahren der IEEE Virtual Reality (VR)*, S. 237-241, 1999.
- [33] KL Nowak, M. Krcmar und KM Farrar, "The Ursachen und Folgen der Präsenz: Angesichts des Einflusses gewalttätiger Videospiele auf Präsenz und Aggression " *Präsenz: Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen*, vol. 17, nein. 3, S. 256-268, 2008.
- [34] RT Surdick, ET Davis, RA King und LF Hodges, "Die Wahrnehmung der Entfernung in simulierten visuellen Anzeigen: Ein Vergleich der Effektivität und Genauigkeit mehrerer Tiefenmarkierungen über Betrachtungsentfernungen hinweg. " *Präsenz: Teleoperatoren und virtuelle Umgebungen*, vol. 6, nein. 5, S. 513-531, 1997.
- [35] RB Ekstrom, JW French, SH Harman und D. Dermen, *Handbuch für Kit faktorbezogener kognitiver Tests*, Pädagogischer Testdienst, Princeton, NJ, 1976.

(fünftzehn)C. Ware und R. Balakrishnan, "Erreichen von Objekten in VR-Displays: Verzögerung und Bildrate", *ACM-Transaktionen zur Computer-Mensch-Interaktion (TOCHI)*, vol. 1, nein. 4, S. 331-356, 1994.