

Frank Steinicke; Gerd Bruder

Im Selbstversuch 24 Stunden in der virtuellen Realität 2015

<https://doi.org/10.25969/mediarep/18162>

Veröffentlichungsversion / published version
Sammelbandbeitrag / collection article

Empfohlene Zitierung / Suggested Citation:

Steinicke, Frank; Bruder, Gerd: Im Selbstversuch 24 Stunden in der virtuellen Realität. Marburg: Schüren 2015 (Jahrbuch immersiver Medien 7), S. 13–26. DOI: <https://doi.org/10.25969/mediarep/18162>.

Nutzungsbedingungen:

Dieser Text wird unter einer Creative Commons - Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0/ Lizenz zur Verfügung gestellt. Nähere Auskünfte zu dieser Lizenz finden Sie hier:

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Terms of use:

This document is made available under a creative commons - Attribution - Share Alike 4.0/ License. For more information see:

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

IM SELBSTVERSUCH 24 STUNDEN IN DER VIRTUELLEN REALITÄT

Frank Steinicke &
Gerd Bruder

Zusammenfassung/Abstract

Virtuelle und digitale Welten sind zu einem wesentlichen Bestandteil unseres täglichen Lebens geworden und viele Aktivitäten, die wir bisher in der realen Welt ausgeübt haben, sind in die digitale Welt übertragen worden, wie beispielsweise Kommunikation, Wissenserwerb, Lernen oder Entertainment. Diese Form des technologischen Wandels ist häufig Thema in der Science-Fiction-Literatur oder Kinematografie, vielfach dargestellt durch dystopische Visionen von Menschen, die ihr Leben in Scheinwelten der virtuellen Realität (engl. *Virtual Reality, VR*) verbringen, indem ihre Körper durch immersive Benutzeroberflächen als Avatare in einen virtuellen dreidimensionalen Raum abgebildet werden.

Um ein besseres Verständnis davon zu erhalten, wie ein Leben in solch einer virtuellen Umgebung (engl. *Virtual Environment, VE*) sich auf Menschen auswirken könnte, haben wir einen Selbstversuch durchgeführt, in dem wir einen Experten aus dem Bereich VR mit einer immersiven virtuellen Umgebung für einen Zeitraum von 24 Stunden konfrontiert haben. Die Sitzungen wurden in 12 Blöcken von je zwei Stunden Länge in der virtuellen Umgebung, gefolgt von jeweils 10 Minuten Pause durchgeführt. Nach unserem Kenntnisstand ist dies die längste wissenschaftlich dokumentierte Einsatz eines immersiven VR-Systems. Das verwendete Setup bestand aus einem Head-Mounted Display (HMD) zur Anzeige des computergenerierten virtuellen Raums. Bewegungen des Benutzers wurden über ein optisches Trackingsystem verfolgt und auf die Bewegung der virtuellen Kamera übertragen. Während des Experiments haben wir qualitative und quantitative Daten erhoben, um zu analysieren, ob und wie die Zeit in einer vollständig isolierten virtuellen Welt menschliche Wahrnehmung, Verhalten, Kognition und Motorik über die Zeit verändert. Die Ergebnisse geben erste Einblicke in und Gestaltungsvorgaben für heutige und künftige immersive virtuelle Umgebungen.

Virtual and digital worlds have become an essential part of our daily life, and many activities that we used to perform in the real world such as communication, e-commerce, or games, have been transferred to the virtual world nowadays. This transition has been addressed many times by science fiction literature and cinematographic works, which often show dystopic visions in which humans live their lives in a virtual

reality (VR)-based setup, while they are immersed into a virtual or remote location by means of avatars or surrogates. In order to gain a better understanding of how living in such a virtual environment (VE) would impact human beings, we conducted a self-experiment in which we exposed a single participant in an immersive VR setup for 24 hours (divided into repeated sessions of two hours VR exposure followed by ten minutes breaks), which is to our knowledge the longest documented use of an immersive VE so far. We measured different metrics to analyze how human perception, behavior, cognition, and motor system change over time in a fully isolated virtual world.

Einführung

Die Interaktion mit virtuellen Daten und Umgebungen spielt eine essenzielle Rolle im Leben vieler Menschen und häufig können sich jüngere Menschen ein Leben ohne diese Technologien nicht mehr vorstellen. Die digitale Revolution hat viele Aktivitäten aus der realen Welt in die virtuelle Welt übertragen. Beispiele umfassen Kommunikation, E-Commerce, Wissenserwerb, Fertigung, Entertainment und Spiele, sind aber nicht auf diese Domänen beschränkt. Empirische Untersuchungen im Kontext der Mediennutzung (Turkle 2011) haben bereits gezeigt, dass insbesondere Jugendliche teilweise mehr Zeit in der virtuellen als in der realen Welt verbringen; Tendenz steigend. Während Computerspiele es den Spielern ermöglichen, in eine interaktive fiktive computergenerierte Umgebung einzutauchen, erlauben es VR-basierte Benutzerschnittstellen (*User Interfaces, UIs*) diese Immersion deutlich zu steigern. Durch die Verwendung von immersiven HMDs in Kombination mit Trackingsystemen ist es möglich, Benutzer mit mehreren Sinnen in eine virtuelle Welt eintauchen zu lassen. Dadurch wird beispielsweise die visuelle und auditive Wahrnehmung des Benutzers von der realen Welt entkoppelt.

Der Benutzer nimmt somit ausschließlich die visuelle Szene auf dem HMD wahr (Abb. 1; links), während alle Bewegungen des Benutzers in der realen Welt, z.B. Gehen oder Kopfbewegungen, auf entsprechende Bewegungen der virtuellen Kamera transferiert werden, wodurch eine aktualisierte Sicht auf die virtuelle Welt bereitgestellt wird (Burdea & Coiffet 2003). Solche immersiven Anwendungen führen in der Regel zu der sogenannten *Place-Illusion*, die dem Benutzer den Eindruck vermittelt, an einem realen Ort zu sein, sowie die *Plausibilitäts-Illusion*, die im Benutzer die Empfindung hervorruft, das dargestellte Szenario sei tatsächlich real (Slater 2009). Diese Illusionen

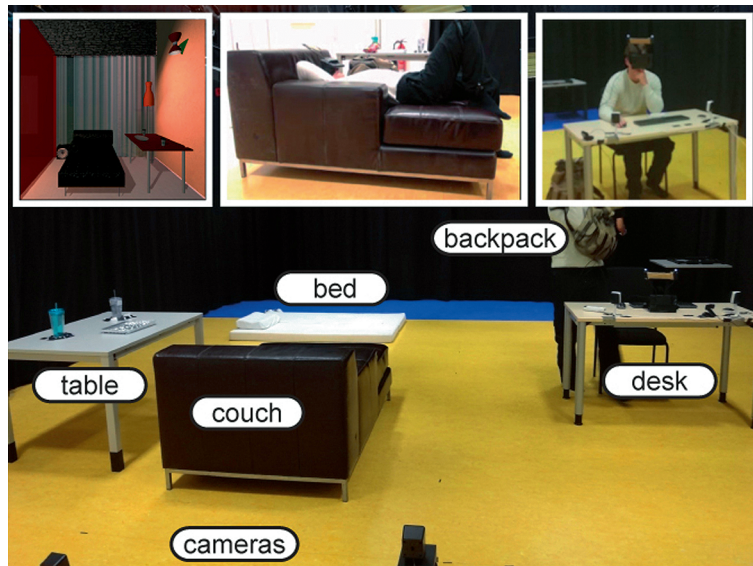
treten unabhängig von der Tatsache auf, dass sich die Benutzer in der Regel darüber bewusst sind, dass sie sich in einer Simulation befinden (Seay et al. 2002).

Bisher werden virtuelle Umgebungen in der Regel nur in sehr spezifischen Anwendungsbereichen wie Ausbildung oder Simulation von Experten verwendet oder im Forschungskontext eingesetzt (Steinicke et al. 2013). Darüber hinaus werden diese Systeme in der Regel nur für sehr begrenzte Zeiträume verwendet, typischerweise für eine Dauer von 5–10 Minuten bis zu einem Maximum von etwa drei bis vier Stunden (ebd.). Mit Hinblick auf aktuelle Technologietrends wie dem Oculus Rift HMD wird jedoch deutlich, dass Menschen bald einen deutlich größeren Teil ihrer Zeit in derartigen immersiven VR-Systemen verbringen werden. Es ist davon auszugehen, dass Anwendungen aus den Domänen Kommunikation, Telepräsenz oder Unterhaltung eine Vorreiterrolle übernehmen werden (Steed et al. 2003). Beispielsweise plant der Künstler Mark Farid, 28 Tage in einer virtuellen Welt zu verbringen, die ihm das zuvor audiovisuell erfasste Leben einer anderen Person auf einem HMD nachstellt.¹ Nach unserem Kenntnisstand hat bis dato noch niemand länger als drei bis vier Stunden in einem immersiven VR-System wie oben beschrieben verbracht. Somit stellt sich die Frage, wie lange sich Menschen in einer vollständig virtuellen Umgebung unter Verwendung von VR-Technologie aufhalten können. Darüber hinaus bleibt die Frage offen, welche Auswirkungen der Gebrauch derartiger Benutzerschnittstellen über einen längeren Zeitraum auf die menschliche Wahrnehmung und Kognition sowie das motorische System hat.

Um einen ersten Eindruck zu erhalten, wie sich diese Szenarien auf Menschen auswirken können, haben wir einen Selbstversuch durchgeführt (Ste-

¹ www.seeing-i.co.uk

➡ 1 Fotos der Testpersonen im immersiven VR-Setup mit Tischen, Stuhl, Couch und Bett. Die Einsätze zeigen (links) die virtuelle Sicht der Testperson, (Mitte) die Testperson während sie sich auf der Couch ausruht und (rechts) während sie am virtuellen Arbeitsplatz sitzt. (© Frank Steinicke & Gerd Bruder)



nicke & Bruder 2014), in dem wir eine Testperson für einen ganzen Tag (d. h. für eine Zeitspanne von 24 Stunden) einer immersiven virtuellen Umgebung ausgesetzt haben (siehe Abschnitt 2). Die Benutzerschnittstelle bestand aus einem Oculus Rift HMD, welches einen computergenerierten virtuellen Raum dargestellt hat. Innerhalb des VR-Setups haben wir reale Objekte arrangiert, darunter einen Stuhl, ein Bett, zwei Tische und eine Couch, die passive haptische Rückmeldungen zu den entsprechenden virtuell erfassten Objekten bereitstellten (Insko 2001). Während der Studie haben wir qualitative und quantitative Daten erhoben. Die Ergebnisse (siehe Abschnitt 3) liefern Implikationen für aktuelle und zukünftige immersive Benutzerschnittstellen und Technologien. Wir diskutieren diese Auswirkungen insbesondere in Bezug auf das Wohlbefinden der Testperson und die Wahrnehmung der virtuellen Welt (siehe Abschnitt 4). Im Gegensatz zu dem Kurzaufsatz (Steinicke & Bruder 2014) beschreiben wir in diesem Artikel das Experiment und die Implikation mit deutlich mehr Details und stellen die Ergebnisse einer Nachfolgestudie vor.

Während in unserem Experiment die Bewegungen der Testperson in einem realen Raum mit denen in einer virtuellen Umgebung übereingestimmt haben, zeigen Science-Fiction-Filme wie *SURROGATES*, *MATRIX*, *AVATAR* oder *WORLD ON A WIRE* ebenso wie viele Science-Fiction-Romane (Dick 1959; Galouye 1964) oft Visionen von einer

Zukunft, in der Menschen ihr Leben über eine VR-basierten Benutzerschnittstelle erleben, während sie auf einem High-Tech-Stuhl liegen und in eine virtuelle Welt eingetaucht werden. Als Ergänzung zum ersten Experiment haben wir die Immersion in einer Ruheposition evaluiert und beschreiben die Studie in Abschnitt 5. Wir diskutieren die ersten Ergebnisse in Abschnitt 6.

Experiment

Aufgrund des enormen Aufwandes, jemanden für eine sehr lange Zeit in ein dauerhaft laufendes vollständig immersives VR-System eintauchen zu lassen und zu beaufsichtigen, haben wir uns dazu entschlossen, die Fallstudie als einen Selbstversuch durchzuführen, indem eine einzige Testperson der immersiven virtuellen Welt ausgesetzt wurde. Wir haben diese spezielle Form des wissenschaftlichen Selbstversuches gewählt, da diese bereits erfolgreich im Bereich der angewandten Verhaltensanalyse von sowohl menschlichen als auch nichtmenschlichen Teilnehmern Anwendung findet. Wir haben uns für das AB-Design als Methode entschieden (Altman 1998), bei dem es sich um ein Zwei-Phasen-Design, bestehend aus einer Betrachtungs- und Eingriffsphase (in unserem Fall entspricht A der Immersion in die virtuelle Umgebung) und eine Baseline-Phase (in unserem Fall entspricht B der realen Umgebung) handelt. Einer der Autoren dieses Artikels hat sich freiwillig

als Testperson für das Experiment zur Verfügung gestellt.

Testperson

Die Testperson (Alter: 37; Größe: 1,86m; Gewicht: 89kg; Body Mass Index: 25,7; Rechtshänder) unseres Experiments ist Informatiker mit über zehnjähriger Erfahrung in den Bereichen Mensch-Computer-Interaktion, Virtueller Realität und 3D-Benutzerschnittstellen. Die Testperson hat an zahlreichen Wahrnehmungsexperimenten in verschiedenen VR-Setups (von semi-immersiven Setups bis hin zu vollständig immersiven VR-Installationen) teilgenommen. Die Dauer der bis dahin durchgeführten Versuche betrug jeweils höchstens zwei Stunden.

Zwei Wochen vor dem Experiment wurde bei der Testperson ein Gesundheitscheck mit Blut- und Urintests, Audiometrie, vollständige Untersuchung des Sehvermögens und ein Test für Augenerkrankungen, insbesondere um Farbschwächen, Amblyopie oder bekannte stereo-optische Störungen zu entdecken, durchgeführt. Laut dieser Tests war die Testperson vor Beginn des Experiments gesund und es waren weder psychische noch physische Störungen oder Einschränkungen bekannt.

Um die Anfälligkeit für Effekte der Bewegungs- und Simulatorkrankheit einzuschätzen, füllte die Testperson einen entsprechenden Fragebogen (MSSQ-S) (Golding 2007) aus. Die Ergebnisse zeigten einen MSSQ-S-Wert von 8,5. Der MSSQ-S-Wert entspricht einer 37,5% Wahrscheinlichkeit für die Anfälligkeit für Bewegungs- und Simulatorkrankheit, was einer durchschnittlichen Sensitivität entspricht. Zusätzlich haben wir bei der Testperson die Tendenz gemessen, sich in einer virtuellen Umgebung präsent zu fühlen. Dafür haben wir den *Immersive Tendencies Questionnaire* (ITQ) genutzt (Witmer & Singer 1998). Die Ergebnisse des ITQ zeigen einen kumulierten Wert von 62 (20 für Fokus, 17 für die Beteiligung, 15 für Emotionen und 10 für Genuss). Die Werte zeigen, dass der Teilnehmer eine durchschnittliche Neigung hat, sich über eine VR-Benutzerschnittstelle in einer virtuellen Umgebung präsent zu fühlen.

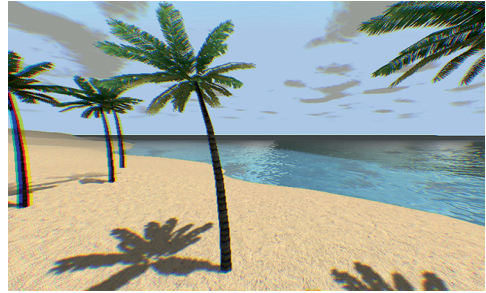
Die Messung der Pupillendistanz (IPD) der Testperson (Willemssen et al. 2008) ergab eine IPD von 6,4 cm. Wir haben diese IPD für die Darstellung von korrekten Perspektiven für die Augen der Testperson in der stereoskopisch dargestellten virtuellen Welt verwendet. Einen Tag bevor das

eigentliche Experiment stattfand, testete die Testperson das gesamte Setup für zwei Stunden. Vor Beginn des Versuchs unterzeichnete die Testperson eine Einwilligungserklärung und wurde aufgeklärt, dass sie den Versuch jederzeit abbrechen konnte.

Materialien

Keine aktuell verfügbare professionelle Benutzerschnittstelle aus dem Bereich der VR ist für einen dauerhaften Betrieb für mehr als 24 Stunden durch einen Benutzer konzipiert. Daher standen wir vor der Herausforderung, unseren Versuchsaufbau auf sehr zuverlässige Komponenten, einschließlich redundanter Software und Hardware zu stützen. Zur gleichen Zeit musste unser Setup übersichtlich, bequem sowie kabelfrei sein, um für die Langzeitnutzung geeignet zu sein und um es dem Teilnehmer zu erlauben, sich sowohl in der realen als auch in der virtuellen Welt möglichst natürlich zu bewegen. Wir entschieden uns, ein redundantes System mit zwei identischen wie folgt beschriebenen Aufbauten zu konstruieren, um potenzielle Software- oder Hardware-Ausfälle während der 24 Stunden kompensieren zu können.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, wurde das Experiment durchgeführt, indem die Testperson ein Oculus Rift DK1 HMD mit aktiven Infrarot-Markern auf dem Kopf getragen hat. Die Infrarot-Marker wurden durch ein optisches WorldViz Precision Position Tracking (PPT X4) System mit Submillimetergenauigkeit für Positionsdaten in einem 8m x 8m großen Laborraum verfolgt. Das PPT-System liefert exakte Trackingdaten, ohne die Notwendigkeit einer erneuten Kalibrierung innerhalb der für das Experiment vorgesehenen Zeitspanne. Wir haben zeitbedingte Abweichungen und Drift in den Orientierungsdaten des Oculus Rift HMD durch das *Optical-Heading-Plugin* des PPT-Systems kompensiert. Das Oculus Rift HMD bietet einen horizontalen Sichtbereich von ungefähr 90° und einen vertikalen Sichtbereich von ungefähr 110° bei einer Auflösung von 1280 x 800 Pixel (640 x 800 pro Auge). Dieses Setup unterstützt eine drahtlose Videoübertragung bei hoher interaktiver Bildrate. Wir verwendeten eine Asus WAVI Funkübertragungsbox, um die gerenderten Bilder mit 60Hz von der Grafikkarte eines Renderingcomputers über das HDMI-Protokoll an das HMD zu übertragen. Wie von den Herstellern angegeben, sollten aufgrund der drahtlosen Verbindung nicht



2 Grafische Darstellungen der zwei virtuellen Umgebungen, die der Testperson während des Experiments zur Verfügung standen: (links) Wohnraum mit Fernseher, Radio, Couch, Bett, Tisch, Stuhl und Schreibtisch, sowie (rechts) virtuelle Insel. (© Frank Steinicke & Gerd Bruder)

mehr als 2 ms Latenz auftreten. Zusätzlich haben wir die Funkübertragung eingesetzt, um die Echtzeitdaten von dem Orientierungssensor im Oculus Rift HMD zurück zum Renderingcomputer zu übertragen. Das HMD und das Asus WAWI wurden von einem tragbaren Anker Astro Pro2 20.000mAh Akku angetrieben, der in den Pausen ausgetauscht und aufgeladen wurde. Die Testperson trug die Geräte während des Experiments in einer kleinen Tragetasche am Körper (Abb. 1).

Um das am Kopf der Testperson zu tragende Gewicht zu minimieren, haben wir uns entschieden, für das auditive Feedback statt Kopfhörern eine 5.1-Surround-Sound-Anlage zu verwenden. Um akustische Störungen außerhalb der virtuellen Welt zu vermeiden, waren die Computer und die Beobachter des Experiments in einem angrenzenden Raum mit einem Beobachtungsfenster untergebracht und somit räumlich von der Testperson getrennt. Der Testperson stand eine Wii-Fernbedienung zur Verfügung, um verschiedene Einstellungen in der virtuellen Welt zu steuern, wie z. B. Änderung der Lichtverhältnisse oder An-/Ausschalten eines virtuellen Fernsehers und/oder Radios. Die virtuelle Umgebung (Abb. 2) des Experiments bestand aus einer 3D-Szene, die mit Unity3D Pro und unserer eigenen Software für das Oculus Rift HMD gerendert wurde (Kuhl et al. 2008). Die Umgebung wurde auf einem Intel-Computer mit einer Core i7 3,8GHz CPU, 8 GB Hauptspeicher und Nvidia GeForce GTX580 Grafikkarte gerendert. Wie in Abbildung 2 dargestellt, bestand die virtuelle Welt aus einem virtuellen Wohnzimmer, ausgestattet mit Fernseher, Radio, Sofa, Bett, Tisch, Stuhl und Schreibtisch. Wir haben einen virtuellen Computer (mit aufeinander abgestimmter physischer Maus und Tastatur) dar-

gestellt, der mit einem realen Computer bezüglich der Ein- und Ausgaben verbunden wurde. Hiermit konnte der Teilnehmer beispielsweise durch Bewegung der Maus mit dem Computer interagieren, während die Bewegung des Mausursors auf einem virtuellen Computerbildschirm in der virtuellen Welt angezeigt wurde. Daher war die Testperson in der Lage, den virtuellen Computer wie einen normalen Desktopcomputer in der realen Welt zu bedienen.

Methoden

Der Proband wurde angewiesen, so lange wie möglich in dem immersiven VR-System zu bleiben. Wir haben die gesamte Zeit in elf Blöcke aufgeteilt, die jeweils aus 2 Phasen bestanden: VR-Phase und Pause. Die VR-Phasen dauerten jeweils zwei Stunden, in denen die Testperson das HMD tragen musste, auf dem die virtuelle Umgebung permanent dargestellt wurde. Die Testperson wurde angewiesen, weder den vom Trackingsystem erfassten Raum zu verlassen, noch das HMD abzunehmen. Demzufolge hat die Testperson kontinuierlich visuelle und auditive Informationen aus der virtuellen Welt erhalten. Mit Ausnahme eines Abbruchcodes war keine Kommunikation mit Personen aus der realen Welt erlaubt. Auf jede VR-Phase folgte eine 10 Minuten Pause (ohne HMD), welche die Nutzung sanitärer Einrichtungen gestattete. Während dieser kurzen Pausen füllte die Testperson Fragebögen aus, beantwortete informelle Fragen und es wurden Fotos der Testperson aufgenommen. Die Pausen waren für die Testperson verbindlich, selbst während der Schlafperioden. Falls erforderlich, wurde die Testperson geweckt. Wie in Abbildung 2 gezeigt, war die

Grundlage der virtuellen Umgebung ein virtueller Raum, ausgestattet mit einem Bett, Stuhl und Tisch, die mit entsprechenden Objekten der realen Welt abgeglichen wurden, so dass die Testperson die Möglichkeit gegeben wurde, dort in der virtuellen beziehungsweise realen Welt zu sitzen oder zu liegen (Abb. 1). Die virtuellen Wände wurden, relativ zu den physikalischen Wänden, versetzt dargestellt, um den optischen Trackingbereich zu optimieren, so dass die physikalischen Wände keine passive Haptik geboten haben (Insko 2001). Innerhalb der virtuellen Umgebung bestand die Möglichkeit, dass sich die Testperson durch «Teleportation» an einen alternativen virtuellen Ort begeben konnte, den wir als virtuelle Insel gestalteten (Abbildung 2b.). Die Teleportation konnte durch einen Tastendruck auf der Wii-Fernbedienung ausgelöst werden. Somit war die Testperson in der Lage, sich zwischen den beiden virtuellen Umgebungen zu bewegen, einen Spaziergang zu machen, am Schreibtisch zu arbeiten oder den Strand zu genießen. Während der gesamten Zeit (mit Ausnahme der Pausen) musste sich die Testperson im Bereich des optischen Trackingsystems aufhalten und das HMD auf dem Kopf tragen, so dass sie permanent die virtuelle Umgebung wahrgenommen hat; auch während des Schlafes wurde das HMD getragen.

Das Experiment begann um 16:20 Uhr. Die Tageszeit in der virtuellen Umgebung wurde mit der realen Zeit unter Einsatz des UniSky-Plugins in der Unity3D-Renderingengine abgeglichen. Demzufolge war es, wenn es in der realen Welt draußen dunkel war, ebenso in der virtuellen Welt dunkel, was es der Testperson ermöglichte, zu schlafen. Da bis dato niemand einen so langen Zeitraum in einem vollständig immersiven VR-System verbracht hat, wurden die Testperson und das Setup aus Sicherheitsgründen zu jeder Zeit von mindestens zwei Versuchsbeobachtern von einem benachbarten Zimmer aus überwacht. Der Teilnehmer wurde mit Speisen und Getränken mit ca. 1969 kcal, entsprechend seiner Stoffwechselrate im Ruhezustand versorgt. Der Testperson wurde nicht mitgeteilt, welche Art von Speisen serviert wurde. Das Essen wurde auf einer vorbestimmten Position auf einem Tisch abgestellt, die mit der Darstellung von virtueller Nahrung in der virtuellen Umgebung abgeglichen wurde. Die Teller wurden mit Essen aufgefüllt, wann immer dies erforderlich wurde.

Datenerfassung

Wir haben qualitative und quantitative Daten gemessen, um zu analysieren, wie sich die menschliche Wahrnehmung und Kognition, sowie das motorische System im Laufe der Zeit in einem komplett immersiven VR-System veränderten.

Audio-/ Videodaten

Die Testperson wurde während des gesamten Experiments mit einer Kamera aufgezeichnet. Mindestens zwei Beobachter überwachten zu jeder Zeit das Hard- und Softwaresetup sowie die Videos während des Experiments.

Methode des lauten Denkens

Wir nutzten die Methode des lauten Denkens (*think aloud protocol*) um die Erfahrungen der Testperson zu erfassen (Ericsson & Simon 1993). Der Proband durfte seine Gedanken jederzeit laut äußern. Die Beobachter waren während des gesamten Experiments passiv, selbst wenn die Testperson für einen längeren Zeitraum still war. Daher wurde die Testperson in den Pausen und im Anschluss an das Experiment in einer unstrukturierten Befragung interviewt (ebd.).

Fragebögen

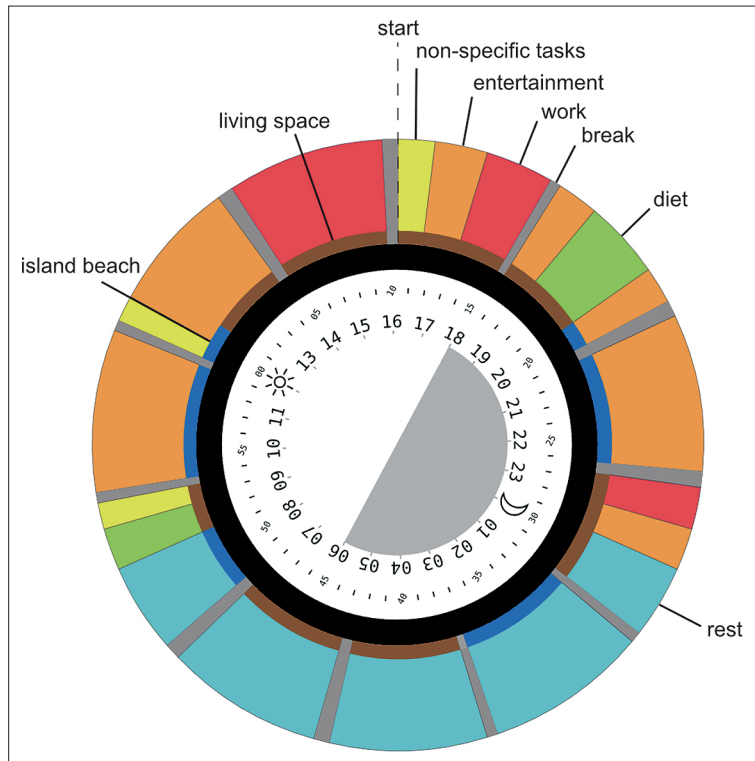
Am Anfang, in jeder Pause und nach dem Versuch hat die Testperson subjektive Fragebögen ausgefüllt. Die Testperson musste Fragebögen zur Simulatorkrankheit (*Simulator Sickness Questionnaire, SSQ*) (Kennedy et al. 1993), Präsenz (*Slater-Usold Steed Questionnaire, SUS*) (Usold et al. 1999), sowie einen Fragebogen zur Arbeitsbelastung (*NASA Task Load Index, TLX*) (Hart 2006) ausfüllen. Am Ende jeder VR-Phase sollte die Testperson eine subjektive Einschätzung ihres Wohlbefindens auf einer 5-Punkte-Likert-Skala im Bereich von «sehr unwohl» bis zu «sehr wohl» abgeben (Likert 1932).

Ergebnisse

Quantitative Ergebnisse

Aufgrund der Tatsache, dass nur eine einzige Person an dem Experiment teilgenommen hat, analysierten wir die quantitativen Daten mit Trendli-

➡ 3 Dominante
Aktivitäten des
Teilnehmers während
des Selbstexperiments.
(Quelle: Eigene
Darstellung)



nien, um den Grad, Trend und die Variabilität der Simulatorkrankheit und das Gefühl der Präsenz zu betrachten.

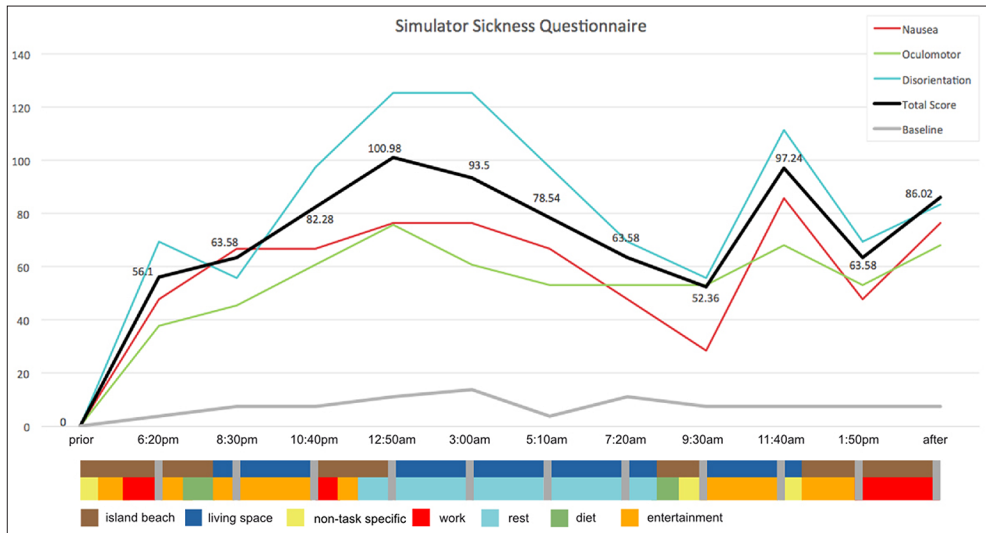
Aktivitäten

Abbildung 3 zeigt die Aktivitäten der Testperson während der 24 Stunden im Uhrzeigersinn. Wir klassifizierten die Aktivitäten in überwiegend ausgeübte Aktivitäten während der entsprechenden Zeitspannen auf Grundlage der aufgezeichneten Videos sowie Notizen und Beobachtungen der Beobachter. Der Mittelkreis zeigt die 24 Stunden vom Beginn um 16:20 Uhr. Der innere Kreis zeigt die Zeit, welche die Testperson entweder am Strand der virtuellen Insel (blaue Farbe) oder in dem virtuellen Wohnzimmer (braune Farbe) verbracht hat. Der äußere Kreis zeigt die primär ausgeübten Tätigkeiten wie Arbeiten (rot), Unterhaltung (orange), Nahrungsaufnahme (grün), Erholung/Ruhe (cyan) oder nichtspezifische Tätigkeiten (gelb). Die meiste Zeit verbrachte die Testperson in dem virtuellen Wohnzimmer (ca. 60%), er wechselte jedoch mehrfach auf die virtuelle Insel (Abb. 2), besonders,

wenn sie ruhte oder die Unterhaltungsangebote nutzte. Den größten Teil der gesamten VR-Zeit (ca. 35%) nutzte die Testperson die verschiedenen Unterhaltungsmöglichkeiten wie z.B. Fernsehen, Radio oder Hörbücher hören. Am Abend und am Morgen wurde die Testperson mit Essen versorgt, was ca. 7% der Zeit in der virtuellen Umgebung ausmachte. Am Anfang und am Ende arbeitete der Proband an dem virtuellen Schreibtisch. Dabei beschäftigte er sich primär mit dem Lesen und Schreiben von E-Mails. Etwa 37% der Zeit in der virtuellen Welt verbrachte er im Bett liegend, ruhend oder schlafend. Laut persönlicher Aussage war es der Testperson nur in der Zeit von 03:00 Uhr bis 07:00 Uhr möglich, etwas zu schlafen. Insgesamt verbrachte sie nur etwa 5% der Zeit mit unspezifischen Tätigkeiten (Abb. 3) wie zum Beispiel Spaziergehen, Erkunden der verschiedenen Bereiche oder Ausprobieren der Fernbedienung.

Simulatorkrankheit

Wie bereits oben beschreiben hat die Versuchsperson vor und nach dem Versuch sowie in den



4 Ergebnisse des SSQ-Fragebogens. Die roten Linien zeigen die Ergebnisse für Übelkeit, die grüne Linie für okulomotorische Symptome und die blaue Linie für Desorientierung. Die kombinierten Ergebnisse in der virtuellen Welt sind mit der schwarzen Linie dargestellt, wohingegen die Baseline (ohne Verwendung von immersiver VR-Technologie) durch die graue Linie dargestellt ist. Die untere Zeile zeigt die Aktivitäten aus Abbildung 3 als horizontale Säulen. (Quelle: Eigene Darstellung)

Pausen SSQ-Fragebögen zur Simulatorkrankheit ausgefüllt. Zwei Wochen nach dem Experiment haben wir einen 24 Stunden Baseline-Test durchgeführt, in dem die Testperson in eine ähnlichen Situation gebracht wurde (mit ähnlichen Aktivitäten und Zeiten wie in dem Experiment), allerdings ohne die Verwendung der VR-Benutzerschnittstelle. Trotzdem musste die Testperson die gleichen Fragebögen ausfüllen. Die Ergebnisse haben wir mit Trendlinien für die Einzelresultate und das Gesamtergebnis des SSQ in verschiedenen Phasen während des Experiments analysiert.

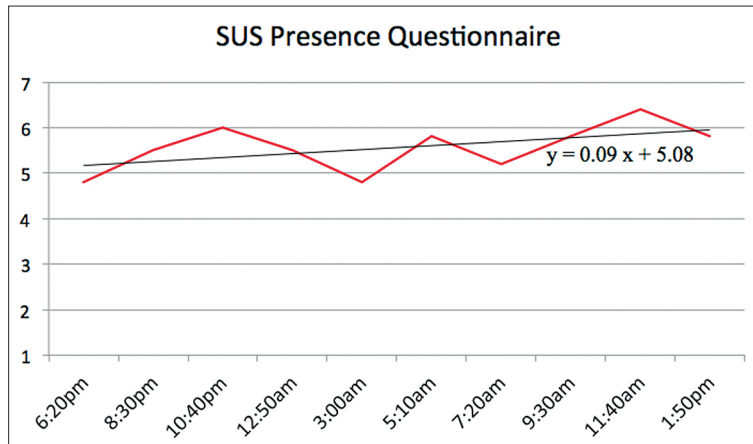
Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für Übelkeit, Augenbewegungen (Okulomotorik), Desorientierung und das Gesamtergebnis für die Kondition mit immersiver VR-Technologie und das Gesamtergebnis für die Baseline-Phase ohne immersive Instrumentierung. Die Baseline-Phase zeigt eine flache Steigung. Die lineare Regression zeigt eine leichte Zunahme der Simulatorkrankheit während dieser Baseline-Phase ($y = 0,37x + 4,97$). Im Gegensatz dazu steigt die Simulatorkrankheit in der Kondition, in der die Testperson dem immersiven VR-System ausgesetzt war. Die lineare Regression der SSQ-Daten ergab in diesem Fall eine Zunahme der Simulatorkrankheit ($y = 3,4x + 47,71$), d.h. etwa 10-mal verstärkt. Überdies zeigt die Betrachtung

des Diagramms ein periodisches Verhalten, d.h. wechselnde Perioden der Zu- und Abnahme, die ungefähr mit den Schlaf- und Ruhephasen des Experiments übereinstimmen. Die Symptome der Simulatorkrankheit wurden insbesondere in den Zeiträumen, in denen die Testperson in mehr oder weniger stabiler horizontaler Position ruhte und/oder schlief schwächer (Abb. 1; Mitte). Die Regression zeigt einen Anstieg in der Zeit zwischen ca. 16:00 Uhr bis 00:00 Uhr ($y = 22,81x + 7,85$), während in der Ruhephase zwischen 00:00 Uhr bis 09:00 Uhr eine Abnahme ($y = -13,84x + 106,59$) zu verzeichnen ist. Nach dieser Phase (ca. 09:00 Uhr bis 16:00 Uhr) zeigt die Regression wieder eine leichte Zunahme ($y = 5,61x + 59,84$).

Gefühl der Präsenz

Wir baten die Testperson, SUS-Präsenzfragebögen während der Pausen auszufüllen. Abbildung 5 zeigt die SUS-Auswertungen. Der durchschnittliche Präsenzwert während des Experiments war 5,59, was bedeutet, dass die Testperson während des gesamten Experiments ein starkes Gefühl der Präsenz hatte. Eine lineare Regression zeigt eine flache Steigung ($y = 0,09x + 5,08$, $r^2 = 0,31$), was verdeutlicht, dass das Gefühl der Präsenz im Laufe

➡ 5 Ergebnisse des SUS-Fragebogens. Die lineare Regression zeigt ein nahezu konstantes Gefühl in der virtuellen Welt präsent zu sein über die Zeit des Experiments. (Quelle: Eigene Darstellung)



der Zeit kaum beeinträchtigt wurde. Nach den persönlichen Aussagen der Testperson traten während des Experiments keine nennenswerten Pausen des Präsenzgefühls auf, was von den Ergebnissen der Fragebögen bestätigt wird. Die Testperson nahm während des Experiments Place- und Plausibilitäts-Illusionen mit einem vergleichbaren Grad wahr (siehe unten).

Qualitative Ergebnisse

Wie zuvor erläutert, verwendeten wir die Methode des lauten Denkens sowie Befragungen in den Pausen und nach Beendigung des Experiments (Ericsson & Simon 1993). Nach den Antworten der Testperson ermittelten wir die folgenden Hauptbeobachtungen:

Simulatorkrankheit: Die Testperson berichtete von deutlichen aber nicht ernstesten Symptomen der Simulatorkrankheit, insbesondere nach Zeiten ausgiebiger Bewegung in der virtuellen Umgebung. Im Unterschied dazu wurden die Symptome sig-

nifikant schwächer, wenn die Testperson auf dem Bett oder dem Sofa lag. Über mögliche Ursachen befragt, wies die Testperson darauf hin, dass solche Haltungen ein stabiles Körpergefühl garantieren mit übereinstimmendem visuellen Feedback, während visuell-vestibuläre Konflikte bei Bewegungen des Kopfes zunehmend spürbar wurden. Es ist eine interessante Frage, ob immersive Benutzerschnittstellen dem Benutzer die Möglichkeit geben sollten, in stabilen Posen zu ruhen, um die Symptome der Simulatorkrankheit zu reduzieren. Des Weiteren berichtete die Testperson von vermindertem Appetit. Die SSQ-Ergebnisse implizieren, dass sich die Simulatorkrankheit kurz nach dem ersten Abendessen und nach dem Frühstück verstärkte.

Präsenz: Je länger sich der Teilnehmer in der virtuellen Umgebung aufhielt, desto mehr hat sich seine wahrgenommene Akkommodationsdistanz verschoben. Nach etwa vier Stunden in der virtuellen Welt, begann der Teilnehmer zu berichten, dass er den Eindruck hatte, die dreidimensionale Umgebung wie auf eine Projektionswand im wahr-

➡ 6 Fotos des Teilnehmers vor dem Experiment, nach 12 Stunden und nach 24 Stunden. (© Frank Steinicke & Gerd Bruder)



genommenen Abstand von bis zu 5 Meter Entfernung projiziert zu sehen. Die Testperson hatte teilweise das Gefühl, sich in einer virtuellen Kugel mit einem 5-Meter-Radius zu befinden, auf den die virtuelle Welt projiziert wurde. Laut den Angaben der Testperson war sie in der Lage, unterschiedliche benachbarte Pixel in einer Weise zu fusionieren, so dass die Projektionsebene aufgrund der modifizierten binokularen Disparität in verschiedenen Abständen erschien.

Ergonomie des HMDs: Die Testperson hat sich weder über das beschränkte Sichtfeld noch über den Tragekomfort des HMD beschwert. Während der ersten und zweiten VR-Phase hat die Testperson ein Symptom von trockenen Augen angegeben, was aus einer verringerten Tränenflüssigkeitsproduktion aufgrund des abgedichteten HMD resultieren könnte. Nach Angaben der Testperson haben sich die Augen an die veränderten Bedingungen während des Experiments angepasst.

Place-Illusion: Mehrmals während des Versuchs hat die Testperson deutliche Place-Illusion gespürt und die virtuelle und reale Welt nicht mehr eindeutig auseinanderhalten können. So fragte der Proband beispielsweise, ob die Beobachter den Stuhl ausgetauscht hätten, da er den Eindruck hatte, der Stuhl hätte die Farbe geändert; der reale Stuhl war schwarz, während der virtuelle Stuhl blau dargestellt wurde.

Plausibilitäts-Illusion: Mehrmals während des Versuchs schätzte die Testperson Ereignisse, die in der virtuellen Umgebung auftraten, als reale Ereignisse ein. Zum Beispiel sagte die Testperson aus, ihr sei während des virtuellen Sonnenuntergangs kalt gewesen, obwohl die Temperatur während des Experiments konstant gehalten wurde.

Um visuelle Veränderungen im Aussehen der Testperson festzuhalten, machten wir in jeder Pause ein Portraitfoto. Abbildung 6 zeigt drei Beispiele, die vor dem Experiment aufgenommen wurden, nach 12 Stunden und nach 24 Stunden. In den Porträts ist eine zunehmende Blässe der Haut zu erkennen, die nach der ersten Sitzung bereits zu beobachten war. Wir beobachteten ebenfalls eine erhöhte Ermüdung der Augen. Weiterhin waren die Abdrücke des HMD um die Augenhöhlen deutlich sichtbar während aller Pausen im Laufe des Versuchs, jedoch zeigten die Hautbereiche, die mit

dem HMD in Kontakt waren während der 24 Stunden keine starken Hautirritationen.

Diskussion

Der Selbstversuch zeigte erste Einblicke, wie sich das Leben in einer virtuellen Welt mit immersiven VR-Technologien auf Menschen auswirken könnte.

Simulatorkrankheit: Insgesamt waren wir überrascht, dass die Testperson nicht zu stark unter der Simulatorkrankheit gelitten hat (der maximal messbare SSQ-Wert liegt bei etwa 540). Der MSSQ-S-Fragebogen hatte für die Testperson eine moderate Anfälligkeit für Bewegungs- und Simulatorkrankheit gezeigt (siehe Abschnitt 2.1). Viele VR-basierte Benutzerschnittstellen führen häufig und schnell zu Simulatorkrankheit und einige VR-Sitzungen müssen deswegen abgebrochen werden (Stanney & Kennedy 1997). Aus diesem Grund war es uns vor dem Experiment nicht vorhersehbar, ob sich die Symptome kontinuierlich über die Zeit erhöhen würden, was zu einem Abbruch des Experiments hätte führen können. Ein interessantes Ergebnis des Experiments ist, dass nach Aussage der Testperson eine komfortable und stabile Haltung das Potenzial hat, Symptome der Simulatorkrankheit drastisch zu reduzieren. Dies kann an der Tatsache liegen, dass in diesen Haltungen die Körpersinne (vestibuläres und kinästhetisches Feedback) den Benutzer informieren, dass er sich physisch nicht bewegt. Somit können wahrgenommene Mikrobewegungen der virtuellen Kamera auf die Darstellung der virtuellen Umgebung zurückgeführt werden und der Proband kann sich sicher sein, dass er sich nicht bewegt hat. Kommentare der Testperson über die Ergonomie des HMDs ergaben, dass die Latenz zwischen physikalischen Bewegungen und dem visuellen Feedback in der virtuellen Welt bei weitem der wichtigste Aspekt war, der in Zukunft für HMDs für längerfristige Nutzung verbessert werden muss (Allison et al. 2001).

Ergonomie des HMDs: In den meisten Situationen ist nach Angabe der Testperson eine hohe Auflösung wichtiger als ein großes Sichtfeld für eine langfristige Verwendung. Dies ist von besonderem Interesse, da frühere Arbeiten gezeigt haben, dass ein großes Sichtfeld zum Gefühl der Präsenz des Benutzers beitragen kann (Seay et al. 2002), die Navigationsleistung und Orientierung verbessern

kann (Arthur 1996; Hassan et al. 2007; Psotka et al. 1998), aber auch das Potenzial hat, Symptome der Simulatorkrankheit zu verstärken (Seay et al. 2002). Die begrenzte Auflösung war ein großes Problem bei der Arbeit an dem virtuellen Schreibtisch. Zur Kompensation der geringen Auflösung hat die Testperson die Schriftgröße erhöhen und die Zoom-Funktion des Betriebssystems einsetzen müssen. Die meisten Aktivitäten wie Fernsehen, Spazierengehen und am Strand sitzen waren von der geringen Auflösung jedoch nicht beeinträchtigt worden und genügten, um überzeugende Place- und Plausibilitäts-Illusionen zu schaffen. Überraschenderweise hat sich der subjektive Eindruck der Präsenz über die Zeit nicht stark verändert, sondern blieb während des gesamten Experiments relativ hoch. Die wahrgenommene Veränderung der Akkommodationsdistanz war ebenso eine interessante Beobachtung und könnte durch verschiedene Illusionen hervorgerufen worden sein.

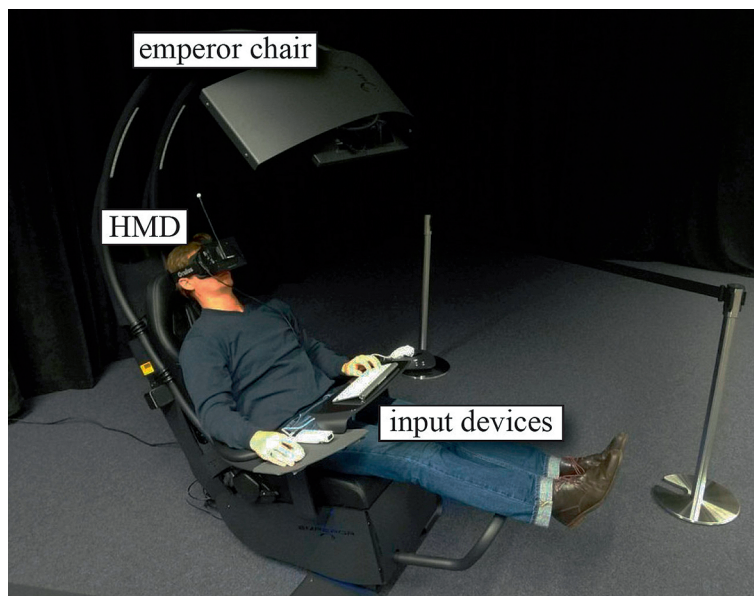
Ernährung: Essen und Trinken unterschieden sich zur realen Welt aus zwei Gründen: Zum einen war der Appetit der Testperson durch die Symptome der Simulatorkrankheit reduziert. Auf der anderen Seite war der Prozess des Essens selbst schwer aufgrund der Eigenschaften des HMDs. Das Essen musste in mundgerechten kleinen Portionen bereitgestellt werden und Getränke mit einem Strohhalm aufgenommen werden.

Post-Evaluation

Insbesondere der Kommentar des Probanden über den Einfluss von stabilen Posen auf die Simulatorkrankheit hat uns motiviert, die Simulatorkrankheit in einer weiteren Evaluation zu untersuchen. Wie von der Testperson angegeben, konnten Symptome der Simulatorkrankheit leicht verringert werden, wenn die Testperson auf dem Bett lag oder auf der Couch eine komfortable stabile Pose eingenommen hat. Inspiriert von der Science-Fiction-Literatur, in der Benutzer oft in futuristischen Stühlen in der realen Welt ruhen, während sie in eine virtuelle Welt eintauchen, haben wir beschlossen, ein ähnliches VR-Setup zu untersuchen.

Das von uns verwendete VR-Setup ist in Abbildung 7 dargestellt. Das Setup ermöglicht eine bequeme Haltung in der realen Welt unabhängig von den durchgeführten virtuellen Aktivitäten. Die Kehrseite der komfortablen Körperhaltung besteht darin, dass dies zu visuell-vestibulären Konflikten führt, während die Testperson sich in der virtuellen Welt fortbewegt und sich der Körper in der realen Welt nicht mitbewegt. Es stellt sich die Frage, ob ein derartiges VR-Setup das Potenzial hat, die Symptome der Simulatorkrankheit zu reduzieren. Um dies zu untersuchen haben wir eine Post-Evaluation durchgeführt mit der gleichen Testperson, die bereits im ersten Versuch teilgenommen hat.

➡ 7 Illustration der Testperson im Emperor-Stuhl während der Post-Evaluation. Interaktionen mit der virtuellen Umgebung, die auf dem HMD dargestellt wurde, waren durch verschiedene Eingabegeräte möglich.
(© Frank Steinicke & Gerd Bruder)



Material und Methoden

Für die Post-Evaluation haben wir das gleiche VR-Setup (HMD, Trackingsystem, Eingabegeräte) wie im ersten Experiment eingesetzt. Allerdings haben wir das Setup mit einem MWE LAB 1510 Emperor-Chair erweitert und die anderen physikalischen Möbel aus dem vorigen Versuch entfernt. Während der gesamten Studie ruhte die Testperson in diesem Stuhl, wie in Abbildung 7 dargestellt. Die Eingabegeräte bestanden wieder aus einer Maus, eine Tastatur und einer Wii-Fernbedienung, welche am Stuhl angebracht waren. Auch in diesem Experiment wurde die physikalische Kopfposition und -orientierung gemessen und auf einer virtuellen Kamera abgebildet. Das Essen wurde auf einem Beistelltisch auf der linken Seite bereitgestellt. Da die Fortbewegung in der realen Welt begrenzt war, haben wir der Testperson eine typische virtuelle Fortbewegungstechnik bereitgestellt, die mit Hilfe eines Nintendo Nunchuck und der Wii-Fernbedienung ausgelöst werden konnte. Unter Einsatz des Joysticks des Nunchucks konnte der Proband sich vorwärts, rückwärts oder seitwärts relativ zur Blickrichtung in der virtuellen Welt bewegen sowie die Blickrichtung wechseln.

In der Post-Evaluation haben wir die gleiche virtuelle Umgebung wie im ersten Versuch genutzt. Die Testperson wurde aufgefordert, die dominanten Aktivitäten aus dem ersten Versuch zu wiederholen. Hierzu zählten speziell die Bewegungen zwischen den verschiedenen Standorten in der virtuellen Welt, die Arbeit am virtuellen Computer sowie die Unterhaltungsmöglichkeiten. Da wir primär an den Symptomen der Simulatorkrankheit interessiert waren, die sich vor allem in den ersten Stunden zu Beginn des Experiments erhöht hatten, haben wir uns entschlossen, den ersten Teil des Experiments in zwei VR-Sitzungen von je zwei Stunden mit 10 Minuten Pause zu evaluieren. Wir haben die Symptome der Simulatorkrankheit und das Gefühl der Präsenz mit den gleichen Fragebögen und Verfahren wie im ersten Versuch gemessen.

Zeit	Experiment	Post-Evaluation
Start	0	0
18:20 Uhr	56,1	29,9
20:30 Uhr	63,58	37,4

Tabelle 1 Vergleich der Ergebnisse des SSQ-Fragebogens zwischen den ersten Phasen beider Versuche.

Ergebnisse und Diskussion

Mit dem SSQ-Fragebogen haben wir einen Wert von 0 vor dem Versuch sowie 29,9 nach zwei Stunden und 37,4 nach dem Experiment gemessen. Die Ergebnisse zeigen eine geringe Zunahme der Simulatorkrankheit. Wie in Tabelle 1 dargestellt, sind diese Werte deutlich niedriger als die entsprechenden Ergebnisse aus dem ersten Versuch.

Mit dem SUS-Fragebogen haben wir einen Wert von 5 nach der ersten VR-Sitzung und einen Wert von 5,67 nach der zweiten VR-Sitzung gemessen. Diese Ergebnisse zeigen ein hohes Maß an Präsenz (Usoh et al. 1999). Im Vergleich zu den Ergebnissen des ersten Experiments sind die Werte nahezu identisch. Nach Angaben der Testperson hat sich die fehlende Möglichkeit der physikalischen Eigenbewegung oder Interaktion mit realen Gegenständen nicht wie erwartet stark negativ auf die Place- und Plausibilitäts-Illusionen ausgewirkt. Die Testperson sagte aus, dass die abgeschwächten Symptome der Simulatorkrankheit das Präsenzgefühl im Vergleich zum ersten Versuch begünstigt hätten.

Ziel dieser Post-Evaluation war es, zu untersuchen ob eine komfortable stabile Pose das Potenzial hat, die Symptome der Simulatorkrankheit zu reduzieren, und gleichzeitig ein hohes Gefühl der Präsenz zu ermöglichen. Die Ergebnisse implizieren, dass derartige Setups tatsächlich das Potenzial hierzu haben, jedoch muss dies in Zukunft mit einer größeren Anzahl an Benutzern und optimierter Hardware und Software validiert werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Soweit uns bekannt ist, haben wir den ersten dokumentierten Selbstversuch durchgeführt, in dem eine Testperson einen ganzen Tag in einer immersiven interaktiven VR-Umgebung verbracht hat. Die Ergebnisse dieses explorativen Selbstversuchs geben interessante Einblicke in die Gestaltung und den Aufbau zukünftiger immersiver VR-Setups. In der Studie haben wir die verschiedenen Auswirkungen der Langzeitznutzung der VR-Benutzerschnittstelle auf die Simulatorkrankheit, das Gefühl in der virtuellen Welt präsent zu sein, sowie die Ergonomie des HMDs untersucht. In der Post-Evaluation haben wir das Potenzial gezeigt, die Symptome der Simulatorkrankheit durch eine stabile Körperhaltung stark zu reduzieren. Die Ergebnisse unserer Post-Evaluation sind vielversprechend, erfordern aber weitere Studien.

In der Zukunft planen wir, die verschiedenen Aktivitäten in immersiven virtuellen Umgebungen wie 3D-Navigation, Selektion und Manipulation auf dem Stuhl der Post-Evaluation unter verschiedenen Bedingungen zu untersuchen. Speziell wird es interessant sein, diese Experimente mit mehreren Teilnehmern mit unterschiedlichen Hintergründen zu wiederholen, sowie die Triangulation der Ergebnisse mit Hilfe von mehreren anderen Methoden wie Herzfrequenz oder Hautleitfähigkeit zu unterstützen. Darüber hinaus könnte die Zeit auch auf einen längeren Zeitraum ausgedehnt werden, wie beispielsweise mehrere Tage.

Die beiden durchgeführten Selbstversuche wurden bewusst auf eine einzelne Testperson beschränkt. Wir haben nicht beobachten können, dass die Versuche bleibende Auswirkungen auf die Gesundheit der Testperson hatten. Es könnte interessant sein, das Experiment mit mehreren Benutzern gleichzeitig durchzuführen, so dass die Teilnehmer eine virtuelle Umgebung gemeinsam erkunden können. Mehrere Teilnehmer könnten sich entweder im gleichen physikalischen Raum oder an entfernten Standorten befinden. Hiermit ließe sich die langfristige Nutzung von immersiven VR-Technologien für Telepräsenz-Anwendungen untersuchen. Mit dem Aufkommen neuer VR-Technologien in den letzten Jahren ist abzusehen, dass immer mehr Menschen diese Systeme zukünftig über längere Zeiträume verwenden werden. Unsere Ergebnisse haben einige Mängel und Herausforderungen offenbart, die gelöst werden müssen, bevor diese Systeme für eine langfristige Nutzung empfohlen werden können.

Literatur

- Allison, Robert S./Harris, Laurence R./Jenkin, Michael/Jasiobedzka, Urszula/Zacher, James E. (2001): Tolerance of Temporal Delay in Virtual Environments. In: *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference (VR)*. S. 247-253.
- Altman, Lawrence K. (1998): *Who Goes First? The Story of Self-Experimentation in Medicine*. Berkeley u.a.: University of California Press.
- Arthur, Kevin W. (1996): Effects of Field of View on Task Performance with Head-Mounted Displays. In: *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*. S. 29-30.
- Burdea, Grigore C. & Coiffet, Phillippe (2003) *Virtual Reality Technology*. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press.
- Dick, Philip K. (1959): *Time Out of Joint*. Philadelphia: J. B. Lippincott Company.
- Ericsson, K. Anders & Simon, Herbert A. (1993): *Protocol Analysis: Verbal Reports as Data*. Cambridge, MA: The MIT Press.
- Galouye, Daniel F. (1964): *Simulacron-3*. New York, NY: Bantam Books.
- Golding, John F. (2007): Predicting Individual Differences in Motion Sickness Susceptibility by Questionnaire. In: *Personality and Individual Differences*, 41, 2. S. 237-248.
- Hart, Sandra G. (2006): NASA-Task Load Index (NASA-TLX) 20 Years Later. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. S. 904-908.
- Hassan, Shirin E./Hicks, John C./Lei, Hao/Turano, Kathleen A. (2007): What is the Minimum Field of View Required for Efficient Navigation? In: *Vision Research*, 47, 16. S. 2115-2123.
- Insko, Brent E. (2001): Passive Haptics Significantly Enhances Virtual Environments. Phil. Diss. Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill.
- Kennedy, Robert S./Lane, Norman E./Berbaum, Kevin S./Lilienthal, Michael G. (1993): Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. In: *The International Journal of Aviation Psychology*, 3, 3. S. 203-220.
- Kuhl, Scott/Thompson, William/Creem-Regehr, Sarah (2008): HMD Calibration and its Effects on Distance Judgments. In: *Proceedings of the Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization (APGV)*. S. 15-22.
- Likert, Rensis (1932) A Technique for the Measurement of Attitudes. In: *Archives of Psychology*, 22. S. 5-55.
- Psotka, Joseph/Lewis, Sonya A./King, Donald (1998): Effects of Field of View on Judgments of Self-Location: Distortions in Distance Estimations Even When the Image Geometry Exactly Fits the Field of View. In: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 7, 4. S. 352-369.
- Seay, A. Fleming/Krum, David M./Hodges, Larry/Ribarsky, William (2002): Simulator Sickness and Presence in a High FOV Virtual Environment. In: *Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*. S. 784-785.
- Slater, Mel (2009): Place Illusion and Plausibility Can Lead to Realistic Behaviour in Immersive Virtual Environments. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Science*, 364, 1535. S. 3549-3557.
- Stanney, Kay M. & Kennedy, Robert E. (1997): The Psychometrics of Cybersickness. In: *Communications of the ACM*, 40, 8. S. 66-68.

- Steed, Anthony/Spante, Maria/Heldal, Ilona/Axelsson, Ann-Sofie/Schroeder, Ralph (2003): Strangers and Friends in CAVes: An Exploratory Study of Collaboration in Networked IPT Systems for Extended Periods of Time. In: *Proceedings of the ACM Symposium on Interactive 3D Graphics (I3D)*. S. 51–54.
- Steinicke, Frank & Bruder, Gerd (2014): A Self-Experimentation Report About Long-Term Use of Fully-Immersive Technology. In: *Proceedings of the ACM Symposium on Spatial User Interaction (SUI)*. S. 66–69.
- Steinicke, Frank/Visell, Yon/Campos, Jenny/Lecuyer, Anatole (2013): *Human Walking in Virtual Environments: Perception, Technology, and Applications*. New York, NY: Springer.
- Turkle, Sherry (2011): *Alone Together: Why We Expect More from Technology and Less from Each Other*. New York: Basic Books.
- Usoh, Martin/Catena, Ernest/Arman, Sima/Slater, Mel. (1999): Using Presence Questionnaires in Reality. In: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 9, 5. S. 497–503.
- Willemsen, Pete/Gooch, Amy/Thompson, William/Creem-Regehr, Sarah (2008): Effects of Stereo Viewing Conditions on Distance Perception in Virtual Environments. In: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 17, 1. S. 91–101.
- Witmer, Bob G. & Singer, Michael J. (1998): Measuring Presence in Virtual Environments: A Presence Questionnaire. In: *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 7. S. 225–240.