

Sensorisches Zusammenspiel des visuellen und vestibulären Systems in Virtual Reality

Nils Henrik Seitz*
Universität Rostock

ZUSAMMENFASSUNG

Virtual Reality erfreut sich immer größerer Beliebtheit. Ein Nebeneffekt der erwünschten Vection, der bei der Nutzung von Virtual Reality häufig auftritt, ist die Cyber Sickness. Diese entsteht durch eine Inkongruenz bei der sensorischen Integration von visuellen und vestibulären Reizen. Medierende Interindividuelle Faktoren sind Alter, Geschlecht, empfundene Kontrolle und Haltungsstabilität. Die Graphik sollte eine hohe Auflösung und Wiederholungsrate sowie niedrige Latenz verfügen. Außerdem sollte sie statische Elemente aufweisen. Zudem sollten kongruente vestibuläre Stimuli erzeugt werden durch VRN-Chairs oder Treadmills. Man kann durch galvanische Vestibulärstimulation für vestibuläre Reize ein „Downweighting“ zu erzeugen, was kurzzeitig die Cyber Sickness reduziert. Dies wird auch durch individualisierbares Equipment erleichtert. Diese Methoden sollten kombiniert angewandt werden.

Keywords: Virtual Reality, Human Factors, Visual-Vestibular Conflict, Motion Sickness, Cyber Sickness

Index Terms: H.1.2 [Models and Principles]: User/Machine Systems—Human factors, Human information processing; H.5.1 [Information Interfaces and Presentation (e.g., HCI)]: Multimedia Information Systems—Artificial, augmented, and virtual realities

1 EINLEITUNG

Evolutionär gesehen, ist es die größte Stärke des Menschen, sich seiner Umgebung oder auch seine Umgebung an sich anzupassen. Daher liegt es in der Natur des Menschen, sich Werkzeuge herzustellen und Erfindungen zu machen, die im Alltag hilfreich sind.

Eine der wichtigsten Grundlagen dafür, denn sie ermöglicht ein hohes, abstraktes Verständnis und die Fähigkeit, zu lernen, ist die multisensorische Integration, ein evolutionäres Wunder, das mehrmals innerhalb einer Sekunde geschieht: Unser Gehirn führt unbemerkt und scheinbar mühelos die Informationen verschiedener Sinne zu einem für uns konsistenten Gesamtbild zusammen. Dass diese Verarbeitung überhaupt stattfindet, bemerken wir eigentlich nur, sobald es dabei zu Komplikationen, das heißt, Abweichungen der bisherigen Erfahrung, kommt.

Eine relativ neue Erfindung ist Virtual Reality, mit der wir erstmalig die Chance haben, unsere Umgebung vollständig nach unserer Vorstellung zu formen, beispielsweise auch mit veränderten physikalischen Gesetzen. Virtual Reality hat enormes Potential viele Bereiche der Gesellschaft nachhaltig zu verändern, nur trifft es sich leider, dass genau bei der Integration der Sensorik Schwierigkeiten auftreten, die als Cyber Sickness bekannt sind.

2 MOTION SICKNESS UND CYBER SICKNESS

In diesem Abschnitt sollen vorrangig grundlegende Arten von Motion Sickness erklärt und gegenüber gestellt sowie Theorien zur Entstehung dieser vorgestellt werden. Außerdem soll darauf verwiesen werden, welche Probleme das für Virtual Reality impliziert.

Die größten Schwierigkeiten, die bei der Nutzung von Virtual Reality auftreten können, sind die Symptome der Cyber Sickness. Diese ähneln denen der klassischen Motion Sickness und umfassen eine Vielzahl unangenehmer Empfindungen und Reaktionen durch den betroffenen Organismus: Kopfschmerzen, Schweißausbrüche, Orientierungslosigkeit, Schwindelanfälle, Ataxia und Übelkeit bis hin zum Erbrechen [12, 14].

Durch die Ähnlichkeit in den körperlichen Reaktionen zur klassischen Motion Sickness, die beispielsweise von Auto- oder Schiffsfahrten bekannt ist, versucht man auch, denselben Erklärungsansatz zu verwenden: die *Sensory Conflict Theory* [9, 12]. Diese postuliert, dass die eben genannten Symptome auftreten, wenn bei der multimodalen, sensorischen Integration¹ bezüglich der Selbstbewegung inkongruente Reize festgestellt wurden und intensiviert sich, wenn die aktuelle Wahrnehmung im Widerspruch mit vorherigen Lernerfahrung in ähnlichen Situationen steht [17].

Ein möglicher Grund, warum manche der Symptome auftreten, könnte laut Treisman [20] ein evolutionärer Schutzmechanismus vor Vergiftung sein. Leider bietet diese Theorie wenig Möglichkeiten zur Prädiktion.

Für die Wahrnehmung von Bewegung ist die Propriozeption, vor allem aber der Gleichgewichtssinn und Sehsinn zuständig. Bei klassischer Motion Sickness besteht das Problem darin, dass keine visuellen Reize vorhanden sind, wie auf der Innenkabine eines Schiffes bei starkem Wellengang, was bekanntermaßen zu Seekrankheit, einer Form der Motion Sickness, führt.

Im Gegensatz dazu entsteht bei Virtual Reality *Vection*² allein durch visuelle Stimuli, ohne das Vorhandensein von vestibulären Reizen. Zwar ist es Ziel der Virtual Reality, eine Vection zu erzeugen, sodass sie immersiv ist und ein Entstehen von Presence gelingt, jedoch ist das mit Virtual Reality Sickness³ negativ korreliert, wie Weech et al. [21] in ihrer Metaanalyse herausfanden (Abbildung 1).

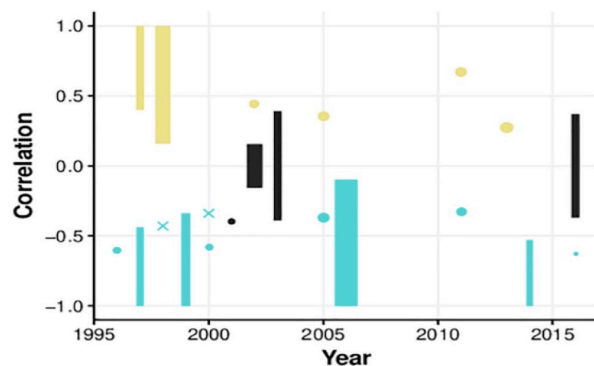


Abbildung 1: Korrelationen von Presence und Cyber Sickness aus der Metaanalyse von Weech et al. [21]. Die Breite der Balken visualisiert die Freiheitsgrade und die Farbe die Signifikanz der Korrelation.

*e-mail: nils.seitz@uni-rostock.de

¹ Verarbeitung der Reize verschiedener Sinneskanäle auf höheren kognitiven Ebenen

² Illusion in der Wahrnehmung der Eigenbewegung

³ Synonym für Cyber Sickness

Bei beiden, klassischer Motion und Cyber Sickness, liegt der *visuell-vestibuläre Konflikt* zu Grunde, jedoch ist die Art, wie dieser entsteht, ebenso wie einige Symptome der beiden, unterschiedlich [18]. Deswegen wird die Sensory Conflict Theory auch teils als Erklärung für die Symptome der Virtual Reality Sickness angezweifelt [12]. Dennoch lässt sich mit ihrer Hilfe gut erklären, warum die Maßnahmen gegen Cyber Sickness in Abschnitt 3 helfen.

Durch die Symptome kann sich eine Aversion gegenüber Virtual Reality entwickeln. Wenn die Teilnehmer das Szenario nicht freiwillig beenden können, kann es im Falle von Trainingsszenarien in virtuellen Umgebungen vorkommen, dass ein unerwünschtes Vermeidungsverhalten, wie Passivität, gefestigt wird [4]. Dies könnte sich kontraproduktiv auswirken. Daher gilt es sich zu überlegen, mit welchen Mitteln man Virtual Reality Sickness kontrollieren und somit die entstehenden Symptome reduzieren kann, um das große Potential von Virtual Reality effektiv nutzen zu können.

3 METHODEN GEGEN CYBER SICKNESS

In diesem Abschnitt sollen verschiedene Maßnahmen gegen Cyber Sickness vorgestellt werden. Darüberhinaus soll erklärt werden, warum diese wirkungsvoll sind und was mögliche Nachteile bei der Nutzung entsprechender Maßnahmen sein könnten.

Die Maßnahmen lassen sich in auf Grund der Sensory Conflict Theory in drei Kategorien einteilen: Reduktion der Inkongruenz der visuellen Reize entgegen der Erfahrung, indem diese optimiert werden (Unterabschnitt 3.1), Generation von kongruenten, vestibulären Stimuli entsprechend der Erwartung durch die visuellen Reize (Unterabschnitt 3.2) und Adaptation durch den Organismus selbst, unter Beachtung bestimmter Faktoren (Unterabschnitt 3.3). Eine generell zu erkennende Tendenz besteht darin, dass diese Methoden versuchen, eine gewohnte **Natürlichkeit** in der virtuellen Umgebung zu erzeugen.

3.1 Anpassung der visuellen Reize

Eine Vection passiert dann, wenn ein **statischer Referenzpunkt** fehlt, an dem man sich optisch fixieren und somit seine Lage relativ dazu sicher feststellen kann. Dies passiert beispielsweise, wenn man aus einem Zug auf einen anderen schaut, ohne den Himmel sehen zu können. Wenn der andere Zug sich in Bewegung setzt, erlebt man kurzzeitig Vection, da hier der Himmel als statische Referenz fehlte.

Daher kann ein unabhängiger Hintergrund, vorrangig bei CAVE Displays, nach Duh und Parker [6] helfen. Natürlich sind die Methoden beispielsweise bei Head-Mounted Displays nicht nutzbar, da diese die visuelle Wahrnehmung der tatsächlichen Umgebung vollständig ersetzen. Eine Methode dennoch einen bekannten Fixpunkt in die virtuelle Umgebung zu integrieren ist die virtuelle Nase wie in Abbildung 2, die laut Wienrich et al. [23] die Intensität von Cyber Sickness bei Nutzung von Head-Mounted-Displays reduzieren kann.

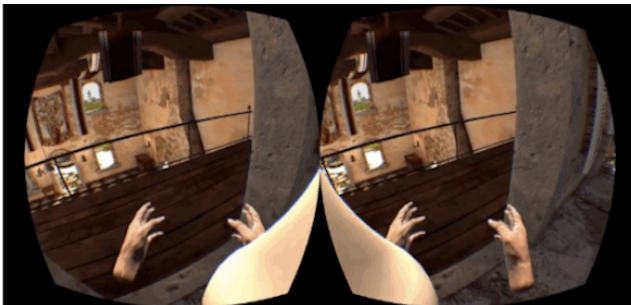


Abbildung 2: Virtuelle Nase zur Reduktion von Cyber Sickness bei Head-Mounted Displays. Bild von WIRED [19], letzter Zugriff: 03.05.2020

Desweiteren ist es für die Reduktion von Cyber Sickness ratsam, wenn die graphische Darstellung und Design der virtuellen Umgebung sich dadurch auszeichnen, dass sie natürlich wirken und ruhige, weite Szenen ohne schnellwechselnde Bewegungen nachbildet. Die Parameter der Graphik sollten wie folgt umgesetzt werden:

Die Auflösung und Wiederholungsrate⁴ sollten angemessen hoch sein [10], das *Field of View* sollte sich nach Fernandes und Feiner [7] dynamisch anpassen und tendenziell eher klein sein und hoch über dem Boden ansetzen, sofern der Kontext, für den die virtuelle Umgebung genutzt wird, das zulässt. Geringe Latenz führte nach Meehan et al. [15] zu mehr wahrgenommener Presence und laut Davis et al. [5] auch zu Cyber Sickness, ebenso wie durch Flickern in der Darstellung der virtuellen Umgebung. Bei all diesen Punkten stellt sich immer die Frage des Aufwandes und der Umsetzbarkeit durch die verfügbare Hardware.

Es scheint, als verursachen realistischere Graphik bzw. Animationen stärkere Cyber Sickness [16]. In Anbetracht der beiden Punkte, statische Referenz und Natürlichkeit, empfehlen sich weite Landschaften in virtuellen Umgebungen und im Sinne der Sensory Conflict Theory, Fortbewegung in Virtual Reality möglichst zu reduzieren⁵, wobei sich hier erneut das Problem ergibt, dass diese Methoden nicht universell einsetzbar sind.

Obwohl mit den genannten Anpassung der visuellen Komponenten die Vection schon wesentlich angenehmer und weniger gestört durch Cyber Sickness sein kann, sodass auch eine Immersion in die virtuelle Umgebung stattfindet, ist es immer möglich zusätzlich kongruente, vestibuläre Stimuli zu erzeugen, sodass die Vection keine Illusion mehr ist, sondern nahe an das tatsächliche Bewegungserlebnis herankommt.

3.2 Erzeugen kongruenter Stimuli

Zu den visuellen Reizen der virtuellen Umgebung können die verschiedenen Sinneskanäle kongruente Stimuli ergänzen, auch durch auditive oder haptische, um die Orientierung im virtuellen Raum zu erhöhen. Vorrangig lässt sich Cyber Sickness aber reduzieren, indem man eine entsprechende Möglichkeit der Bewegung einräumt, während man in der virtuellen Umgebung ist. Dies ist vor allem durch sogenannte VRN-Chairs und Treadmills möglich.

VRN-Chairs sind Rollstühle, die mit magnetischen Sensoren ausgestattet werden, sodass die Bewegung der Räder des Rollstuhls passend in die Virtual Reality übertragen werden kann. Durch gleichgerichtete Drehung der Räder kann eine Vor- oder Rückwärtsbewegung, durch entgegengesetzte Drehung eine Rotation in die jeweilige Richtung erzeugt werden. Durch unterschiedlich starkes Drehen können Kurven gefahren werden. Laut Byagowi [3] reduzieren VRN-Chairs Cyber Sickness und haben den Vorteil, dass sie barrierefrei sind, sodass sie auch in speziellen medizinischen Szenarien genutzt werden können. Generell treten im Sitzen in Virtual Reality weniger Symptome von Cyber Sickness auf. Der Nachteil von VRN-Chairs liegt in Anwendungen, welche die dritte Dimension in der virtuellen Umgebung stark beanspruchen.

Eine weitere Möglichkeit der Lokomotion in der virtuellen Realität sind Treadmills. Diese sind in der Regel omnidirektional, sodass Bewegung in alle Richtungen möglich ist. Nach Aldaba und Moussavi [1] sind VRN-Chairs gegenüber Treadmills effektiver, da sie den Reizen der natürlichen Bewegung eher entsprechen und dadurch die Symptome der Cyber Sickness weniger intensiv sind, wie in Abbildung 3 zu sehen ist. Desweiteren beanspruchen Treadmills oft viel Raum. Außerdem sind sie gegenüber VRN-Chairs nicht barrierefrei und wesentlich kostenintensiver.

Ohne eine tatsächlich stattfindende Bewegung, die dann durch die Trägheit der Flüssigkeit in den Bogengängen des Innenohrs einen Reiz erzeugt, funktioniert die *galvanische Vestibulärstimulation*, bei der das Gleichgewichtsorgan nicht-invasiv di-

⁴50-60 Hz, nach Davis et al. [5]

⁵In Computerspielen zum Beispiel Teleportation nutzen

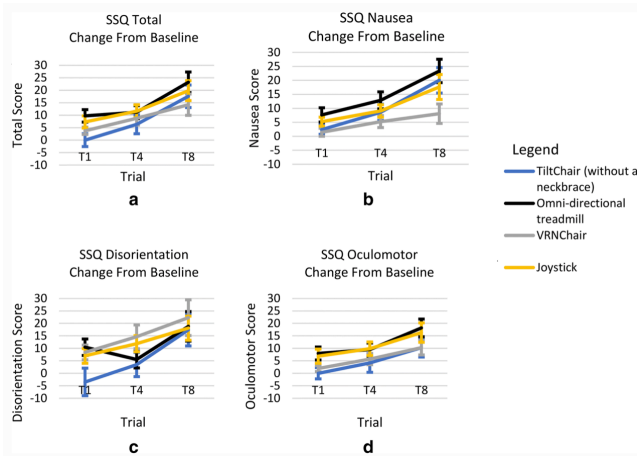


Abbildung 3: Vergleich verschiedener Methoden bezüglich Cyber Sickness von Aldaba und Moussavi [1]. Niedrige SSQ-Scores bedeuten weniger Cyber Sickness.

rekt stimuliert wird. Nach Weech et al. [22] kann sie kurzzeitig Cyber Sickness reduzieren, während und kurz nach der Reizung. Galvanischen Vestibulärstimulation scheint effektiv zu sein, weil der Organismus in der virtuellen Umgebung die Gewichtung der Sinneskanäle neu bestimmt. Vestibuläre Reize werden als unzuverlässig empfunden und es finden ein *Down-Weighing* statt, wogegen sich mehr auf die visuellen Stimuli verlassen wird und diese stärker gewichtet werden. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass es noch relativ unerforscht ist und Auswirkungen auf höhere kognitive Schichten unbekannt sind.

Wenn ein Organismus sich nach so kurzer Zeit schon anzupassen beginnt, stellt sich die Frage, wie die Adaptation nach längerer Zeit mit regelmäßiger Nutzung aussieht und welche weiteren Faktoren das Auftreten von Cyber Sickness noch beeinflussen können.

3.3 Adaptation und interindividuelle Faktoren

Damit eine Anpassung an virtuelle Realitäten gelingt, ist es wichtig zu wissen, welche Faktoren über die Inkongruenz der visuellen und vestibulären Stimuli hinaus dafür eine medierende Rolle haben, sodass man durch die Art und Weise wie und bei wem Virtual Reality genutzt wird, die Adaptation erleichtern kann.

Je länger die sukzessiv verbrachte Zeit in einer virtuellen Realität während einer Session, desto intensiver werden die Symptome der Cyber Sickness [2], wie auch in Abbildung 3 deutlich wird. Werden mehr Versuche am Stück durchgeführt werden, so erhöhen sich die Scores des SSQ. LaViola [14] konnte zeigen, dass eine Gewöhnung an die Virtual Reality stattfindet und sich über mehrere Sessions hinweg so die Cyber Sickness reduziert.

Durch Langzeitpotenzierung verändern sich Neuronen, was als Lernen bezeichnet wird. Wie bereits von der galvanischen Vestibulärstimulation bekannt ist, kann innerhalb einer Session eine veränderte Verarbeitung der Reize stattfinden, was offenbar auch bleibende Effekte hat. Also lernt man, mit der neuen Situation in der virtuellen Realität umzugehen. Es empfiehlt sich daher, mit kurzen Sessions zu beginnen und die Länge sukzessiv zu erhöhen, um dem Organismus Zeit zu geben, sich anzupassen und wenig Belastung durch die Symptome der Cyber Sickness zu verursachen. Hier muss man sich die Frage stellen, ob der Kontext, in welchem die Virtual Reality genutzt werden soll, genug Zeit für eine Gewöhnungsphase einräumt.

Ein weiterer Faktor ist die Kontrolle, die man in der virtuellen Umgebung hat [11]. Dies liegt daran, dass sich bestimmte Sinneswahrnehmungen errahnen lassen, wenn man in der virtuellen Um-

gebung selbst bestimmen kann, was als nächstes passiert. Im Sinne der Theorie, dass Motion Sickness einen evolutionären Vergiftungsschutz darstellt, ist dieser Faktor sinnvoll. Nervengifte erzeugen nicht nur eine Inkongruenz zwischen den verschiedenen Sinnen, sondern lähmen auch Muskeln, sodass man keine Kontrolle mehr hat. Daher reagiert der Körper intensiv, was die Symptome der Cyber Sickness zur Folge hat.

Davis et al. [5] nennen eine Reihe interindividueller Faktoren: Alter, Krankheit, Haltung und Geschlecht. Kinder besitzen danach die höchste Anfälligkeit für Cybersickness, was sich mit zunehmendem Alter reduziert. Die Flüssigkeit der Bogengänge des Innenohrs wird ebenfalls mit zunehmendem Alter viskoser, sodass die vestibulären Stimuli weniger intensiv sind, was wiederum zu weniger Inkongruenz mit den visuellen Reizen führt.

Generelle gesundheitliche Probleme, Erkrankungen sowie Alkohol- und Drogenkonsum [13] erhöhen ebenfalls die Anfälligkeit für Cyber Sickness. Zur Haltung gilt zu sagen, dass Leute mit einer stabileren Haltung weniger unter Cyber Sickness leiden als solche mit einer instabilen. Außerdem führt Virtual Reality im Sitzen ausgeführt zu weniger Symptomen als stehend.

Geschlecht gilt als weiterer Faktor. Tendenziell leiden Frauen eher an Cyber Sickness als Männer [1]. Frauen scheinen ein weiteres Field of View zu haben, was Cyber Sickness erhöht, wie in Unterabschnitt 3.2 erklärt wurde. Darüberhinaus können weibliche Hormone die Anfälligkeit erhöhen [11].

Ein letzter Faktor, der die Adaptation erschweren könnte, ist die Passform des technischen Equipments für den Anwender, mit dem virtuelle Realitäten dargestellt werden - insbesondere bei HMD⁶. Der Pupillenabstand bei Menschen folgt einer Normalverteilung, jedoch ist der Abstand bei Männern durchschnittlich höher als bei Frauen und die aktuelle Standardgröße entspricht im Mittel eher der interpupillaren Distanz bei Männern [8], sodass die Nutzung im Verhältnis für Männer angenehmer ist, ersichtlich in Abbildung 4.

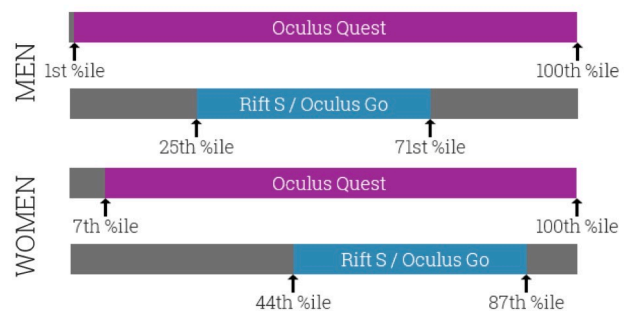


Abbildung 4: Perzentile erwachsener Männer und Frauen für die das jeweilige HMD anhand des Pupillenabstandes am besten geeignet ist. Rift S besitzt einen festen Abstand, im Gegensatz zu Oculus Quest. Bild von UploadVR [8], letzter Zugriff: 04.05.2020

Dieser Faktor könnte auch eine Erklärung für einige der interindividuellen Faktoren sein, insbesondere Alter und Geschlecht. Da die Erfahrung durch eine schlechte Passform des Head-Mounted Displays für den Anwender visuell gesehen wesentlich unnatürlicher ist, treten Symptome von Cyber Sickness auf.

4 FAZIT

Cyber Sickness entsteht durch eine Form des visuell-vestibulären Konflikts und ist, auf Grund der entstehenden Symptome, ein zentraler Aspekt der Nutzung von Virtual Reality. Diese können das Erlebnis in einer virtuellen Realität unerträglich machen.

⁶ Akronym von Head-Mounted Display

Es wurden in Abschnitt 3 eine Reihe verschiedener Methoden vorgestellt, mit deren Hilfe man, vor allem durch Kombination der Methoden und unter Beachtung bestimmter Faktoren, Cyber Sickness reduzieren kann. Das generelle Prinzip der Natürlichkeit oder Vertrautheit, das es einzuhalten gilt, zieht sich durch die Maßnahmen. Dieses Wissen kann helfen, in Zukunft einen besseren, für den Anwender angenehmeren Umgang mit weniger Cyber Sickness-Symptomen in Virtual Reality zu ermöglichen. Dennoch haben diese Methoden nur bedingte Gültigkeit und Übertragbarkeit, da es sich hierbei noch eher um Grundlagenforschung handelt.

Jedoch ist es wichtig zu verstehen, dass momentan keine Theorie existiert, die die Phänomene von Cyber Sickness vollständig erklären kann. Daher ist es auch nicht möglich zu sagen, ob Cyber Sickness und klassische Motion Sickness denselben Ursprung haben. Dennoch beziehen sich viele Studien über Cyber Sickness in Virtual Reality auf ältere Studien, in denen es eigentlich um klassische Motion Sickness oder Simulator Sickness geht und versuchen ähnliche Ergebnisse im Sinne der Sensory Conflict Theory zu finden. Dies hat oft widersprüchliche Ergebnisse zur Folge.

Weiterhin folgt aus dieser „Vererbung“ von der klassischen Motion Sickness an die Cyber Sickness, dass in der Literatur keine eindeutige Nomenklatur herrscht, in der Begriffe wie Cyber Sickness, Virtual Reality Sickness, Simulator Sickness und Motion Sickness teils synonym verwendet werden, ohne dass dies gerechtfertigt ist, da es keine genauen Definitionen für die jeweiligen Begriffe gibt.

Ausgehend von einer exakteren Benennung wird dann zusätzliche Forschung benötigt, um eine bessere Theorie zur Erklärung von Cyber Sickness zu finden. Auch müssen neue Messverfahren erschlossen werden, da viele der Messung aktuell auf Selbstauskünften beruhen, welche subjektiv verfälscht sein können. Durch Umsetzen dieser drei Punkte würden danach eindeutige, weniger widersprüchliche und vor allem besser vergleichbare Ergebnisse entstehen. Es ist wichtig, das nicht zu vernachlässigen, während in der Zwischenzeit mit den aktuellen Gegebenheiten weitergeforscht wird.

Zuletzt sollte bei zukünftiger Forschung und der Umsetzung neuer Methoden an verschiedenste Gruppen gedacht werden, damit keine Ungleichheit zwischen Gruppen herrscht, wie das bei der Passform der Head-Mounted Displays in Abbildung 4 der Fall war. Der Mensch hat sich in seiner Evolution über die Zeit schon an verschiedenste Gegebenheiten angepasst, somit ist anzunehmen, dass sich selbiges auch auf Virtual Reality gilt. Bis dahin müssen wir uns aber selbst bestmöglich, durch eben genannte Verbesserung und mit Methoden gegen Cyber Sickness, unterstützen, um das große Potential, welches Virtual Reality innewohnt, effektiv nutzen zu können.

DANKSAGUNG

Der Autor möchte Amon Ties Uerckwitz für die Zusammenarbeit im Themengebiet „Human Factors and Perception“ danken.

LITERATUR

- [1] C. N. Aldaba and Z. Moussavi. Effects of virtual reality technology locomotive multi-sensory motion stimuli on a user simulator sickness and controller intuitiveness during a navigation task. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 58(1):143–154, Nov 2019. doi: 10.1007/s11517-019-02070-2
- [2] C. N. Aldaba, P. J. White, A. Byagowi, and Z. Moussavi. Virtual reality body motion induced navigational controllers and their effects on simulator sickness and pathfinding. In *2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, pp. 4175–4178, 2017. doi: 10.1109/EMBC.2017.8037776
- [3] A. Byagowi, D. Mohaddes, and Z. Moussavi. Design and application of a novel virtual reality navigational technology (vrnchair). *Journal of Experimental Neuroscience*, 8:JEN.S13448, Jan 2014. doi: 10.4137/jen.s13448
- [4] J. Crowley. Simulator sickness: a problem for army aviation. *Aviation, space, and environmental medicine*, 58(4):355357, April 1987.
- [5] S. Davis, K. Nesbitt, and E. Nalivaiko. A systematic review of cybersickness. In *Proceedings of the 2014 Conference on Interactive Entertainment*, IE2014, p. 19. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2014. doi: 10.1145/2677758.2677780
- [6] H. Duh and D. Parker. Does a peripheral independent visual background reduce scene-motion-induced balance disturbance in an immersive environment? 05 2001.
- [7] A. S. Fernandes and S. K. Feiner. Combating vr sickness through subtle dynamic field-of-view modification. In *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, 2016. doi: 10.1109/3DUI.2016.7460053
- [8] D. Heaney. Data suggests oculus rift s ipd range best for just half of adults. (Date last accessed 03.05.2020).
- [9] D. M. Johnson. Introduction to and review of simulator sickness research. 2005.
- [10] R. Kirolos. *Visual-Vestibular Sensory Integration During Congruent and Incongruent Self-Motion Percepts*. PhD thesis, Carleton University, 2019.
- [11] E. M. Kolasinski. *Simulator sickness in virtual environments*, vol. 1027. US Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, 1995.
- [12] E. M. Kolasinski and R. D. Gilson. Simulator sickness and related findings in a virtual environment. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 42(21):1511–1515, Oct 1998. doi: 10.1177/154193129804202110
- [13] R. KRUK. Simulator sickness experience in simulators equipped with fiber optic helmet mounted display systems. *Flight Simulation Technologies Conference*, Aug 1992. doi: 10.2514/6.1992-4135
- [14] J. J. LaViola. A discussion of cybersickness in virtual environments. *ACM SIGCHI Bulletin*, 32(1):47–56, Jan 2000. doi: 10.1145/333329.333344
- [15] M. Meehan, S. Razzaque, M. C. Whitton, and F. P. Brooks. Effect of latency on presence in stressful virtual environments. In *IEEE Virtual Reality, 2003. Proceedings.*, pp. 141–148, 2003. doi: 10.1109/VR.2003.1191132
- [16] M. Pouke, A. Tiir, S. M. LaValle, and T. Ojala. Effects of visual realism and moving detail on cybersickness. In *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 665–666, 2018. doi: 10.1109/VR.2018.8446078
- [17] J. Reason and J. Brand. *Motion Sickness*. Academic Press, 1975.
- [18] K. M. Stanney, R. S. Kennedy, and J. M. Drexler. Cybersickness is not simulator sickness. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 41(2):1138–1142, Oct 1997. doi: 10.1177/107118139704100292
- [19] L. Stinson. How to reduce vr sickness? just add a virtual nose.
- [20] M. Treisman. Motion sickness: an evolutionary hypothesis. *Science*, 197(4302):493–495, 1977. doi: 10.1126/science.301659
- [21] S. Weech, S. Kenny, and M. Barnett-Cowan. Presence and cybersickness in virtual reality are negatively related: A review. *Frontiers in Psychology*, 10, Feb 2019. doi: 10.3389/fpsyg.2019.00158
- [22] S. Weech, T. Wall, and M. Barnett-Cowan. Reduction of cybersickness during and immediately following noisy galvanic vestibular stimulation. *Experimental Brain Research*, 238(2):427–437, Jan 2020. doi: 10.1007/s00221-019-05718-5
- [23] C. Wienrich, C. K. Weidner, C. Schatto, D. Obremski, and J. H. Israel. A virtual nose as a rest-frame - the impact on simulator sickness and game experience. In *2018 10th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications (VS-Games)*, pp. 1–8, 2018. doi: 10.1109/VS-Games.2018.8493408