

Entwicklung einer Software zur standardisierten Testung künstlicher Bewegungsmethoden in Virtual Reality und Analyse ihrer Verträglichkeit in verschiedenen Nutzergruppen

Inauguraldissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

des Fachbereichs Humanmedizin

der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von Bernhard Kaus, geb 18.07.1990

aus Gießen

Gießen 2025

Aus dem Fachbereich Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen

Institut für Medizinische Informatik (IMI)

Die Disputation erfolgte am 24.07.2026

Betreuer: Herr Prof. Dr. Schneider, Henning

Gutachterin: Frau Prof. Dr. Hauschild, Anne-Christin

Ehrenwörtliche Erklärung

„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nichtveröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten sowie ethische, datenschutzrechtliche und tierschutzrechtliche Grundsätze befolgt. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, und dass die vorgelegte Arbeit weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt wurde. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt und indirekt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Mit der Überprüfung meiner Arbeit durch eine Plagiatserkennungssoftware bzw. ein internetbasiertes Softwareprogramm erkläre ich mich einverstanden.“

Ort, Datum

Unterschrift (Bernhard Kaus)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zielsetzung	8
3	Material und Methoden	10
3.1	Virtual Reality.....	10
3.2	Einsatz von Virtual Reality in der Medizin	19
3.3	Kinetose und Simulatorkrankheit	22
3.4	Fragebogenbasierte Erfassung von Simulatorkrankheit	25
3.5	Eingesetzte Hardware	29
3.6	Nutzerspezifische Einflussfaktoren	32
3.6.1	Alter	32
3.6.2	Geschlecht.....	32
3.6.3	Sportliche Aktivität.....	33
3.6.4	Videospielkonsum.....	33
3.6.5	Vorerfahrung mit VR-Systemen	34
3.6.6	Selbsteinschätzung bezüglich der Anfälligkeit für Reisekrankheit	34
3.6.7	Vorhandensein von Fehlsichtigkeit.....	35
3.6.8	Weitere Fragen.....	35
3.7	Softwareentwicklung	36
3.7.1	Planung der Softwareentwicklung	37
3.7.2	Entwicklungsumgebung.....	39
3.7.3	Anforderungen des Lastenhefts	40

3.7.4	Umsetzung von Raumgrenzen	41
3.7.5	Design des virtuellen Testraums und Implementation von natürlichem Laufen	44
3.7.6	Weitere Anpassung des virtuellen Testraums und Implementation der künstlichen Bewegungsmethoden.....	47
3.8	Testablauf.....	50
3.9	Fallzahlplanung und Probandenakquise	51
3.10	Statistische Analyse	53
4	Ergebnisse	54
4.1	Probandenkollektiv	54
4.1.1	Probandenkollektiv – Alter und Geschlecht	54
4.1.2	Probandenkollektiv - Fehlsichtigkeit	55
4.1.3	Probandenkollektiv – Vorerfahrung VR	56
4.1.4	Probandenkollektiv – Anfälligkeit für Reisekrankheit	56
4.1.5	Probandenkollektiv – Stunden Sport pro Woche.....	57
4.1.6	Probandenkollektiv – Videospielkonsum	58
4.2	SSQ-Resultate und Einfluss der Software	60
4.3	SSQ-Differenz gegenüber Prätest und Einfluss der Subskalen	63
4.4	Vergleich der Bewegungsmethoden untereinander	66
4.5	Einfluss der Bewegungsmethoden auf Ebene der Einzelitems.....	67
4.6	Analyse möglicherer weiterer Einflussfaktoren	68
4.6.1	Analyse der Einflussfaktoren – Geschlecht	70
4.6.2	Analyse der Einflussfaktoren – Fehlsichtigkeit	71

4.6.3	Analyse der Einflussfaktoren – Vorerfahrung mit VR-Systemen	73
4.6.4	Analyse der Einflussfaktoren – Selbsteinschätzung Reisekrankheit ..	74
4.6.5	Analyse der Einflussfaktoren – Sport	77
4.6.6	Analyse der Einflussfaktoren – Alter.....	78
5	Diskussion	81
6	Zusammenfassung.....	89
7	Summary	91
8	Literaturverzeichnis.....	93
9	Abbildungsverzeichnis	115
10	Abkürzungsverzeichnis	119
11	Publikationsliste	120
12	Anhang	121
12.1	Anhang 1 SSQ (nach Mehlitz [137])	121
12.2	Anhang 2 Lastenheft.....	122
12.3	Anhang 3 Fragebogen zur Probandenerfassung	126
12.4	Anhang 4 Aufklärung	129
12.5	Anhang 5 Untersuchungsprotokoll	137
12.6	Anhang 6 weitere Berechnungen/Tabellen.....	138
12.6.1	Posthoc-Vergleich der Bewegungsmethoden untereinander für Subskalen des SSQ	138
12.6.2	Analyse der Einflussfaktoren – Geschlecht	139

12.6.3 Analyse der Einflussfaktoren – Fehlsichtigkeit	140
12.6.4 Analyse der Einflussfaktoren – Vorerfahrung VR.....	142
12.6.5 Analyse der Einflussfaktoren – Selbsteinschätzung Reisekrankheit	145
12.6.6 Analyse der Einflussfaktoren – Sport	146
12.6.7 Analyse der Einflussfaktoren – Alter.....	148
13 Danksagung.....	149

Hinweis:

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit bei personenbezogenen Substantiven und Pronomen, die sich auf alle Geschlechter beziehen, das generische Maskulinum verwendet. Die verkürzte Sprachform beinhaltet keinerlei Wertung.

1 Einleitung

Die moderne Medizin unterliegt, wie nahezu alle Lebensbereiche, einem ständigen technologischen Wandel, der immer neue Möglichkeiten für Diagnose, Therapie und Patientenversorgung eröffnet. Beispielsweise können moderne Fitnesstracker und Smartwatches wichtige Verlaufsdaten liefern, um Behandlungen genauer auf Patienten zuzuschneiden. Telemedizin kann nicht nur die Kommunikation zwischen Arzt und Patient erleichtern, sondern auch die Zugänglichkeit medizinischer Versorgung verbessern und Operationsroboter gewinnen zunehmend in der Chirurgie an Bedeutung [1]–[4]. Eine weitere neue Technologie, die in den letzten Jahren – auch im medizinischen Bereich – zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist Virtual Reality (VR). VR beschreibt eine Simulationstechnik, die es zum Ziel hat, dem Nutzer möglichst überzeugend eine real scheinende virtuelle Welt darzustellen und ihn mit dieser interagieren zu lassen [3], [5]–[8]. Als Simulationssystem werden in der Regel spezielle Brillen eingesetzt, die als Virtual-Reality-Brillen (VR-Brillen) oder Virtual-Reality-Headsets (VR-Headsets) bezeichnet werden [6], [7], [9]. Das Kernelement des Systems bildet die namensgebende Brille, die wie eine Skibrille vor den Augen des Nutzers getragen wird (siehe Abbildung 1-1 und Abbildung 1-2). Im Inneren der Brille befinden sich ein oder mehrere Displays, sowie Linsen zur Darstellung der computergenerierten dreidimensionalen (3D) Inhalte [7], [10], [11].



Abbildung 1-1 VR-Headset (von *Entertainment Technology Center* aus [12], lizenziert unter CC BY 2.0)

Im Gegensatz zu 3D-Brillen wie im Kino, die lediglich eine dreidimensionale Betrachtung von Filmen ermöglichen, werden in modernen VR-Systemen Daten über Position, Bewegung sowie Blickrichtung des Nutzers erfasst und die dargestellten Inhalte dynamisch an diese Parameter angepasst. Auf diese Weise wird die Illusion einer virtuellen Welt erzeugt, in der sich der Nutzer auf natürliche Weise bewegen und umschauen kann. Auch Interaktionen mit der virtuellen Welt sind möglich (siehe Abbildung 1-2) [7], [10], [11], [13].



Abbildung 1-2 Nutzer einer VR-Brille (eigene Darstellung)

Im medizinischen Bereich können die Headsets genutzt werden, um 3D-Bildgebungsdaten wie MRT- oder CT-Aufnahmen realistisch darzustellen und besser räumlich zu erfassen [14]–[17]. Es können realistische – und kostengünstige – Simulationsumgebungen geschaffen werden, in denen ein Operateur sich eine (über)lebensgroße Darstellung eines Operationsgebietes ansehen, oder eine komplexe Operation vorab simulieren kann [14], [17]–[21]. Patienten mit Phobien können von Desensibilisierungsbehandlungen in realistischen Umgebungen profitieren. Beispielsweise können Patienten mit Akrophobie (Höhenangst) einer Umgebung an einem virtuellen Abgrund ausgesetzt werden, die für den Patienten realistisch aussieht, jedoch ungefährlich ist und aus der der Patient jederzeit schnell „entfliehen“ kann, indem er das Headset absetzt [22]–[26]. Auch im Bereich der Rehabilitation finden VR-Anwendungen zunehmend Verwendung, um beispielsweise

Patienten nach einem Schlaganfall mit zielgerichteten Trainings zu unterstützen [27]–[29].

Auch abseits des medizinischen Sektors findet die VR-Technologie zunehmend Anwendung. So werden im Bereich der Automobilindustrie VR-Headsets unter anderem eingesetzt, um den Innenraum von Fahrzeugen zu evaluieren, ohne einen kostenintensiven Prototyp zu fertigen [30]–[32].

Architekten und Baufirmen können geplante und 3D-modellierte Gebäude realistisch darstellen und in Lebensgröße präsentieren. Auf diese Weise können Gebäude virtuell begangen werden noch bevor ein Bauvorhaben umgesetzt wurde [33], [34].

In den letzten Jahren hat sich die VR-Technik deutlich weiterentwickelt und es wird davon ausgegangen, dass ihre Verbreitung in den kommenden Jahren weiter zunehmen wird [35]–[38]. Mit der zunehmenden Verbreitung dieser neuen Technologie ist es jedoch auch wichtig, mögliche Risiken und Probleme zu betrachten. Eines der Probleme, das in Zusammenhang mit VR vorkommen kann, ist das Auftreten von Kinetosen bzw. Simulatorkrankheit (SK) [39]–[42].

Kinetosen beschreiben vegetative Reaktionen des Körpers, die durch ungewohnte Bewegungen oder Sinneseindrücke von Bewegung ausgelöst werden und Symptome wie Kopfschmerzen, Schwindel und Übelkeit bis hin zum Erbrechen umfassen können [43], [44]. Das Phänomen ist, in Form der Reisekrankheit, seit der Erfindung von Fortbewegungsmitteln bekannt. Bereits antike Autoren berichten von Schiffskrankheit bei Seeleuten während des Wellengangs oder beim Transport von Personen in gezogenen Wagen oder getragenen Sänften [45], [46]. Erklärt werden Kinetosen in der Regel durch das sensorische Konfliktmodell (englisch *sensory mismatch*), welches vereinfacht aussagt, dass es zu einer Nichtübereinstimmung zwischen mehreren Systemen kommt, die für die menschliche Positions- und Bewegungserfassung im Raum von entscheidender Bedeutung sind: dem visuellen System zur Erfassung von Bewegungen und Situationen, dem Gleichgewichtsorgan zur Erfassung von Bewegungsimpulsen und den Erinnerungen an vergleichbare, vorherige Situationen. Wenn es zwischen diesen Systemen zu einem Widerspruch kommt, können Kinetosen auftreten [43], [46]–[49]. In der Schifffahrt können sie beispielsweise auftreten, wenn sich ein Seefahrer unter Deck befindet, das Schiff sich jedoch durch Seegang bewegt. Das Gleichgewichtsorgan nimmt die Bewegungen des

Schiffes als Beschleunigungen wahr, die Augen können aber keine entsprechende Bewegung registrieren [43], [50]. Der fortwährende technologische Fortschritt hat dazu geführt, dass es immer neue Situationen gibt, in denen Symptome einer Reisekrankheit ausgelöst werden können, z.B. bei Rummelplatzattraktionen wie Achterbahnen, in Flugzeugen, bei Autofahrten oder auch im Weltraum. Anhand der auslösenden Situationen können Subformen der Kinetose abgegrenzt werden. So werden Kinetosen im Weltraum auch als *space sickness* bezeichnet, auf Schiffen als Schiffskrankheit und Kinetosen in Simulationsumgebungen (wie VR) werden auch als Simulatorkrankheit (SK) oder *cyber sickness* bezeichnet [49], [51], [52]. Weiterhin gibt es Situationen, in denen Symptome einer Reisekrankheit nicht durch das Auftreten einer realen Bewegung, sondern durch Abwesenheit eines erwarteten Bewegungsimpulses verursacht werden. Dies kann beispielsweise in Flugsimulatoren auftreten, wenn das Gehirn visuell eine Situation erfasst, in der es einen Bewegungsimpuls erwartet, dieser jedoch nicht (in adäquater Weise) auftritt. Diese Form der Kinetose wird auch als Pseudokinetose bezeichnet [43], [53]–[55].

Einer der Auslöser von SK in VR ist der Einsatz von künstlichen Bewegungsmethoden um den Nutzer durch die virtuelle Welt zu bewegen (siehe auch Kapitel 3.3) [39], [41], [42], [56]. Ein wesentlicher Aspekt von VR-Inhalten ist – wie bereits erwähnt – die Möglichkeit der realistischen Bewegung und Interaktion. Moderne VR-Systeme sind in der Lage, die Position des Nutzers in einem mehrere Quadratmeter großen Bereich mit hoher Genauigkeit zu erfassen. Dieser Bereich wird auch als *playspace* bezeichnet [57]. Die Bewegungen innerhalb des *playspace* werden in die virtuelle Welt übertragen, wodurch der Nutzer die Illusion vermittelt bekommt, in Wahrheit durch die virtuelle Welt zu laufen [11], [13], [58]. Dieses System stößt jedoch an seine Grenzen, wenn eine virtuelle Welt simuliert werden soll, die größer ist als der zur Verfügung stehende reale Raum. Nun kann der Nutzer nur noch einen Teil der virtuellen Welt erkunden, da er sich den Grenzen des *playspace* nähert, bevor er die Grenzen der virtuellen Welt erreichen kann. Der Nutzer kann also nur einen Teil der virtuellen Welt durch reales Umherlaufen erreichen. Um dieses Problem zu umgehen, verwenden VR-Anwendungen (ergänzend) künstliche Bewegungsmethoden, die den Nutzer virtuell bewegen. Dies bedeutet, dass sich der virtuelle Blickpunkt des Nutzers bewegt, ohne dass eine entsprechende physische Bewegung des Nutzers erfolgt [41], [42], [59]. Die Folge dieser virtuellen Bewegung ist, dass sich der

virtuelle Raum relativ zum realen Raum verschiebt und somit vorher unerreichbare Areale erreichbar, gleichzeitig jedoch auch vorher erreichbare Areale unerreichbar werden. In Abbildung 1-3 ist die Funktionsweise und Notwendigkeit künstlicher Bewegungsmethoden schematisch dargestellt: Der Nutzer befindet sich in einer virtuellen Welt. Der *playspace* ist jedoch kleiner als die virtuelle Welt und deckt nur einen Teil dieser ab. Der Nutzer kann das graue Dreieck nicht durch natürliches Laufen erreichen, ohne das reale Testareal zu verlassen. Verwendet der Nutzer eine künstliche Bewegungsmethode, verschieben sich realer Raum und virtueller Raum relativ zueinander und ein vorher unerreichbares Objekt kann von dem Nutzer erreicht werden.

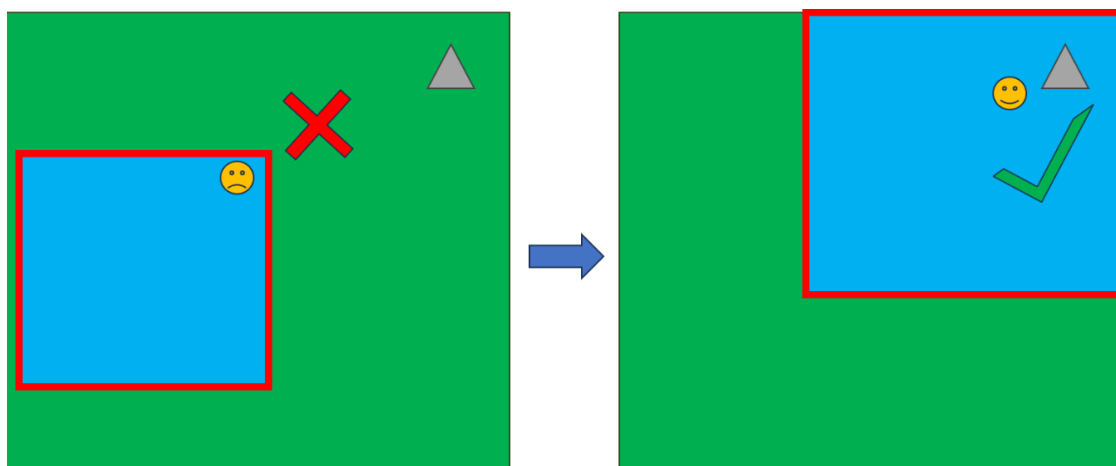


Abbildung 1-3 Notwendigkeit und Prinzip virtueller Bewegungsmethoden:
 Gelber Smiley = Nutzer, grün = virtuelle Welt, blau = *playspace*, rote Linie = Grenzen des *playspace*/mögliche Hindernisse in der realen Welt, graues Dreiecke = Zielpunkt (eigene Darstellung).

Es existieren eine Vielzahl an – teils experimentellen – Methoden, solche künstlichen Bewegungen umzusetzen. Die meisten Bewegungsmethoden lassen sich jedoch den beiden Überbegriffen *Teleportation* und *Fließbewegung* zuordnen [41], [59]–[62]. *Teleportation* bezeichnet im Rahmen dieser Arbeit Bewegungsmethoden, bei denen die virtuelle Position des Nutzers von einem Moment auf den anderen von Punkt A zu Punkt B wechselt, während *Fließbewegung* eine simulierte Kamerafahrt von Punkt A zu Punkt B beschreibt, ähnlich wie in Computerspielen aus der Ich-Perspektive. Detaillierter werden künstliche Bewegungsmethoden in Kapitel 3.1 betrachtet.

Durch künstliche Bewegungsmethoden wird das Problem eines begrenzten Nutzungsbereichs gelöst. Sie können jedoch zu einem sensorischen Konflikt und damit – wie eingangs erwähnt – zum Auftreten von Reisekrankheit, bzw. Simulatorkrankheit führen [39], [41], [42], [50], [56], [63]–[67]. Dies ist von besonderer Bedeutung, da anzunehmen ist, dass der potenzielle (medizinische) Nutzen von VR-Anwendungen auch von der Verträglichkeit dieser Technik abhängt: Ein Patient wird weniger wahrscheinlich eine VR-Therapieoption in Erwägung ziehen, wenn diese bei ihm Übelkeit auslöst, als wenn dies nicht der Fall ist. Sollten VR-Headsets in Operationen eingesetzt werden, wäre es offensichtlich ebenfalls nicht wünschenswert, wenn der operierende Chirurg sich plötzlich „seerkrank“ fühlen würde, zumal gezeigt werden konnte, dass Kinetosen mit einer akuten Verringerung der mentalen Leistungsfähigkeit einhergehen können [68]–[70].

Um das Auftreten von SK zu reduzieren, ist es wichtig, ihr Auftreten zunächst strukturiert zu erfassen. Eine einfache und weit verbreitete Methode hierzu ist der *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ, zu Deutsch Simulatorkrankheitsfragebogen) – ein Fragebogen, der 16 Symptome abfragt, deren Vorhandensein, bzw. Symptomschwere die Nutzer in vorgegebenen Schweregraden bewerten müssen. Ursprünglicher Einsatzzweck des SSQ war die Evaluation von Flugsimulatoren für die amerikanische Luftwaffe. Er findet jedoch auch weit verbreitete Anwendung in der Untersuchung von Simulatorkrankheit in VR-Anwendungen [42], [63], [71].

Zur Entstehung von SK in VR werden eine Reihe weiterer Einflussfaktoren diskutiert, wie das Ausmaß des dargestellten Blickfelds sowie die Latenz, mit der die virtuelle Sicht des Nutzers aktualisiert wird [72], [73]. Nutzerspezifische Einflussfaktoren wie das Geschlecht, Alter, eine höhere Anfälligkeit für Reisekrankheit in anderen Situationen und genetische Faktoren sind ebenfalls Gegenstand aktueller Forschung [39], [42], [73], [74]. Genauer werden nutzerspezifische Einflussfaktoren in Kapitel 0 betrachtet.

In jüngerer Zeit hat sich gezeigt, dass ein wichtiger Aspekt von VR-Erfahrungen, der zum Auftreten von SK beitragen kann, die dargestellte Simulationsumgebung selbst ist. Saredakis *et al.* zeigten in einer großen Literaturanalyse über SK in VR, dass die beste Verträglichkeit in Simulationsumgebungen vorlag, die sie als „scenic“ bezeichneten. Hierunter fallen realistische 3D-Umgebungen, die keine oder nur minimale Nutzerinteraktion erfordern. Eine besonders schlechte Verträglichkeit zeigte sich hingegen bei Computerspielssoftware, sowie bei räumlichen Videoaufnahmen, die in VR dargestellt wurden

[42]. Dies stellt eine Herausforderung für die Erforschung von Einflussfaktoren und somit auch für die Entwicklung verträglicherer Software dar, da gerade Spielesoftware häufig für VR-Studien zum Thema SK genutzt wird [42], [74], [75].

Die Fülle an möglichen Einflussfaktoren auf die Auftretenswahrscheinlichkeit von Symptomen einer SK erschwert es, isoliert den Einfluss von künstlichen Bewegungsmethoden zu untersuchen. Um den Effekt, den verschiedene künstliche Bewegungsmethoden auf das Auftreten von SK haben, aussagekräftiger zu evaluieren, ist es daher notwendig, angepasste Software zu entwickeln.

Aufgrund der Fähigkeit neuerer VR-Systeme, Bewegungen in mehrere Quadratmeter großen Arealen zu erfassen, wäre es möglich, in einer Software künstliche Bewegungsmethoden direkt mit einer Bewegung durch natürliches Umherlaufen zu vergleichen. Auf diese Weise könnten mögliche Einflüsse, die nicht durch die künstliche Bewegungsmethode, sondern z.B. durch die dargestellte Umgebung ausgelöst werden, erkannt werden. Würde ein Nutzer beispielsweise Symptome einer Simulatorkrankheit entwickeln, weil sich Unwohlsein aufgrund der dargestellten Spielumgebung oder von Hardwareproblemen (wie z.B. eine höhere Latenz bei der Bilddarstellung) einstellt, so sollte sich dieser Effekt auch zeigen, wenn sich der Nutzer durch natürliches Laufen durch die Umgebung bewegt. Zeigt sich hingegen ein (stärkerer) Effekt bei Verwendung einer künstlichen Bewegungsmethode, nicht jedoch bei Fortbewegung durch natürliches Laufen in gleicher Umgebung, so wäre dieser Effekt vermutlich auf die künstliche Bewegung zurückzuführen.

Eine solche Software könnte helfen, SK-auslösende Aspekte in der Softwareentwicklung zu identifizieren und verträglichere Software zu entwickeln. In Anbetracht der enormen Chancen, die VR – vor allem im medizinischen Bereich – bietet, könnte dies einen Beitrag zur weiteren Verbreitung der Technologie leisten.

2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit verfolgt die Ziele eine Software zu entwickeln, die als neutrale Testplattform für medizinische Tests in VR dienen kann, diese Software als neutrale Testplattform zu validieren und im Anschluss zu überprüfen wie sich die Verträglichkeit verschiedener Bewegungsmethoden in dieser Software unterscheiden. Im Detail bedeutet dies:

Das erste Ziel ist die Entwicklung einer Software, mit deren Hilfe strukturierte Untersuchungen über das Auftreten von Simulatorkrankheit (SK) in VR durchgeführt werden können. Der Fokus liegt dabei auf der Testung von künstlichen Bewegungsmethoden in VR. Die Software soll eine neutrale virtuelle Umgebung darstellen, die möglichst wenig ungewünschten Einfluss auf das Auftreten von Symptomen einer SK nimmt. Weiterhin soll die Software die Möglichkeit bieten künstliche Bewegungsmethoden direkt mit natürlichem Laufen zu vergleichen. So soll erreicht werden, dass gewonnene Daten nicht durch andere Einflussfaktoren als die getesteten Bewegungsmethoden beeinträchtigt werden bzw. eine mögliche Verfälschung erkennbar wird. Die Software soll möglichst leicht anpassbar gestaltet werden, damit sie als Testbasis für weitere Forscher dienen und weitere Forschung in einer kontrollierten Umgebung ermöglichen kann. Es soll eine Reihe von Bewegungsmethoden implementiert werden, die möglichst einfach zu bedienen sind und die – basierend auf bisherigen Erkenntnissen – eine hohe Bandbreite an Verträglichkeit aufweisen.

Mit dieser Software soll eine Testreihe durchgeführt werden und Daten über das Auftreten von SK-Symptomen, bei Verwendung von verschiedenen künstlichen Bewegungsmethoden, gewonnen werden. Die Symptomausprägung nach Bewegungsart soll mittels des *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ) erfasst werden, einem Fragebogen, dessen Verwendung zur Erfassung von SK in VR weit verbreitet ist [42], [76]–[78].

Zweites Ziel ist es, die gewonnen Daten zu nutzen, um zu überprüfen inwiefern in der fertigen Software SK-Symptome durch die dargestellte Umgebung oder das verwendete VR-System – also unabhängig von künstliche Bewegungsmethoden – ausgelöst werden. Hierzu soll überprüft werden, ob bereits bei der Verwendung von natürlichem Laufen (keine künstliche Bewegungsmethode) ein Anstieg von SK-Symptomen im SSQ ausgelöst wird.

Drittes Ziel es, zu überprüfen, ob die Software umgekehrt in der Lage ist, einen messbaren Anstieg der Symptome durch künstliche Bewegungsmethoden auszulösen.

Viertes Ziel ist es zu überprüfen, ob sich im Rahmen dieser Testreihe ein Einfluss weiterer in der Literatur diskutierter nutzerspezifischer Einflussfaktoren, wie beispielsweise Alter oder Geschlecht, auf die Auftretenswahrscheinlichkeit von SK-Symptomen zeigt.

Aus den gewonnenen Daten sollen Erkenntnisse abgeleitet werden, die es ermöglichen VR-Software verträglicher zu gestalten.

3 Material und Methoden

3.1 Virtual Reality

Der Begriff Virtual Reality (VR) – oder zu Deutsch virtuelle Realität – beschreibt Versuche, eine virtuelle, dreidimensionale Welt möglichst realitätsnah zu simulieren. Es wird eine computergenerierte Welt dargestellt, die dem Nutzer – im Gegensatz zu dreidimensionalen Inhalten auf einem Computerbildschirm – das Gefühl vermitteln soll, sich an dem virtuell simulierten Ort zu befinden. Dies wird erreicht indem möglichst viele Sinnesindrücke (auditive, visuelle und haptische) in hoher Qualität simuliert werden [6]–[8], [79], [80]. Wie in Kapitel 1 dargestellt, nutzen moderne Systeme meist sogenannte VR-Headsets oder VR-Brillen, um diese Simulation zu realisieren. Dabei handelt es sich um Anzeigegeräte computergenerierter 3D-Inhalte, die wie eine Skibrille vor den Augen des Nutzers getragen werden. Im Inneren der Brillen befinden sich Bildschirme für die Darstellung sowie Linsen, die die Illusion eines realistischen Blickfeldes ermöglichen. Durch Lagesensoren innerhalb des Headsets sowie zusätzliche externe Sensoren oder Kameras wird die Position des Headsets im Raum erfasst und die dargestellten Inhalte dynamisch an Positionsänderungen angepasst (englisch *tracking*) [10], [11]. Dadurch wird es möglich, sich natürlich im virtuellen Raum zu bewegen und umzusehen (Abbildung 3-1).



Abbildung 3-1 Nutzer einer VR-Brille (1) mit Controllern (2) und System zur Positionserfassung (3) (eigene Darstellung).

Zusätzlich kann mithilfe spezieller Controller mit der virtuellen Welt interagiert werden. Die Controller werden hierzu ebenfalls getrackt und ermöglichen es somit die Position der Hände des Nutzers im Raum zu erfassen. Die Umsetzung von weiteren Interaktionen unterscheidet sich dabei je nach System erheblich. Einige Modelle nutzen Knöpfe, Steuerknüppel und Touchpads. Andere Modelle sind in der Lage, einzelne Fingerbewegungen (*Fingertracking*), z.B. mit speziellen Handschuhen zu erfassen (Abbildung 3-2 Seite 12 und Abbildung 3-4 Seite 14) [7], [10], [11], [81].



Abbildung 3-2 VR-Controller verschiedener VR-Systeme: links = Meta Quest 3, mitte = HTC Vive, rechts = Valve Index (eigene Darstellung)

Lautsprecher oder Kopfhörer können eingesetzt werden, um eine virtuelle Welt auch auditiv zu erleben. Um die Inhalte in möglichst hoher Qualität darzustellen, wird das VR-Headset in der Regel mit einem leistungsstarken Computer verbunden, es existieren jedoch mittlerweile auch Geräte, die die notwendige Hardware innerhalb des Headsets verbauen [13], [58], [82].

Die Erfindung des ersten VR-Headsets wird häufig Ivan Sutherland zugeschrieben, der bereits im Jahr 1965 in seiner Arbeit „*The Ultimate Display*“ das theoretische Konzept einer VR-Brille vorstellte. Bis 1968 konstruierte er einen als „*Head Mounted Display*“ bezeichneten ersten Prototypen, der ein stereoskopisches Bild mittels Kathodenstrahlröhren in das Sichtfeld des Nutzers projizieren und an die Kopfposition des Nutzers anpassen konnte. Die Brille musste mit einer aufwändigen Konstruktion an der Decke befestigt werden, die, aufgrund ihrer über dem Nutzer hängenden Position, als „*Sword of Damocles*“ bezeichnet wurde (Abbildung 3-3) [7], [9], [79], [83]–[85]. Die grundsätzliche Idee einer solchen Technik bestand jedoch bereits noch länger. So beschrieb beispielsweise

der Science-Fiction Autor Stanley Weinbaum bereits im Jahr 1935 in seinem Buch „*Pygmalions Spectacles*“ eine virtuelle Brille die einem modernen VR-Headset sehr nahe kommt [86].

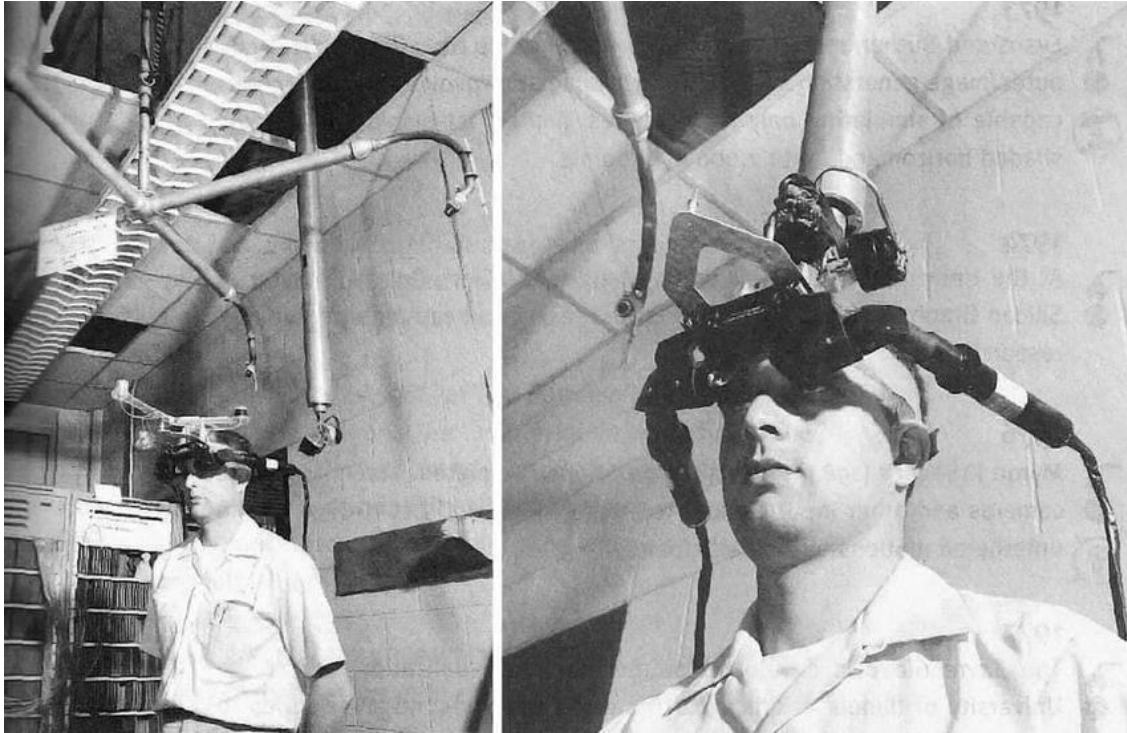


Abbildung 3-3 VR-Headset von Ivan Sutherland und Haltesystem „Sword of Damocles“ (aus [79] und [84] mit freundlicher Genehmigung von Ivan Sutherland und Aryabrata Basu)

In den 1980er Jahren gründete Jaron Lanier das Unternehmen VPL-Research, welches neben VR-Brillen auch Geräte zur Interaktion mit der virtuellen Welt entwickelte, wie Datenhandschuhe und ganze Anzüge, um Körperbewegungen zu erfassen (Abbildung 3-4) [8], [87].



Abbildung 3-4 Datenhandschuh der Firma VPL-Research mit virtueller Entsprechung der getrackten Hand auf dem Cover von Scientific American 1987 (Abbildung von John Brenneis ([88]), mit freundlicher Genehmigung der Familie Brenneis)

Verglichen mit heutigen VR-Produkten war die damalige VR-Hardware jedoch unter anderem durch die Leistungsfähigkeit der verfügbaren Computerhardware limitiert, was vor allem die Qualität der dargestellten Grafik als auch der Positionserfassung massiv einschränkte. In den kommenden Jahren wurde mehrfach versucht VR-Produkte am Markt zu etablieren, auch durch große Unternehmen wie beispielsweise Nintendo in den 1990er Jahren mit dem sogenannten *Virtual Boy* (Abbildung 3-5) [7], [79]. All diesen Lösungen gelang es jedoch nicht sich in einem relevanten Maße am Markt zu etablieren. Über die Gründe des damaligen Scheiterns kann nur spekuliert werden. Zu den Schwachstellen der Technik gehörte jedoch, dass sie nicht in der Lage war, hoch aufgelöste Bilder mit niedriger Latenz zu produzieren, dass die Geräte in der Regel sehr teuer waren und dass Nutzer über Unwohlsein klagten [6], [8], [85].



Abbildung 3-5 Nintendo Virtual Boy (Evan Amos, zugeschnitten und neu angeordnet aus [89], public domain)

In den 2010er Jahren kam eine neue Generation von VR-Headsets auf, die – in Kombination mit signifikant gesteigerten 3D-Renderingfähigkeiten moderner Computer – erstmals überzeugende VR-Erfahrungen zu einem erschwinglichen Preis versprachen [8]. Im Jahr 2016 erschienen schließlich sowohl das VR-Headset *Oculus Rift* (Abbildung 3-6) als auch das Konkurrenzprodukt *HTC Vive*. Beide ermöglichten es, die Bewegung des Nutzers im Raum mit äußerst niedriger Latenz zu erfassen [11]. In Verbindung mit den ebenfalls getrackten Controllern in jeder Hand des Nutzers ist es möglich, sich in einem Areal von mehreren Quadratmetern frei zu bewegen und mit der virtuellen Welt in nahezu Echtzeit zu interagieren [13], [58]. Beide genannten Modelle verfügten über wesentlich höhere Auflösungen und Bildwiederholraten als bisherige VR-Brillen und richteten sich nicht nur an kommerzielle Nutzer, sondern waren mit Preisen von unter 1.000 Euro auch für Endkunden erschwinglich [82]. In den folgenden Jahren erhöhte sich die Verbreitung deutlich. Steam – eine Plattform für den Vertrieb von Computerspielen – führt monatlich Befragungen über die verwendete Hardware unter ihren Nutzern durch und zeigt seit einigen Jahren einen ca. zweiprozentigen Anteil von Nutzern, die ein VR-Headset verwenden [90]–[92]. Da es sich bei Steam um eine private Firma handelt, die ihre Umsätze nicht

veröffentlicht, ist nicht genau bekannt, wie hoch die Verbreitung der Software ist. Verschiedene Quellen gehen jedoch davon aus, dass bis zu 75% aller Käufe von Computerspielen über Steam erfolgen [93]–[96]. Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass diese Zahlen zumindest die Größenordnung der Verbreitung von VR unter Computerspielern widerspiegeln. Anzumerken ist hierbei, dass die Hardware der Nutzer bei dieser Befragung automatisch erfasst wird, und das System daher nur VR-Headsets erfasst, die zum Zeitpunkt der Umfrage an den PC des Nutzers angeschlossen waren [91], [97]. Auch in professionellen Anwendungen findet VR zunehmend Verwendung, insbesondere auch im Gesundheitssektor (siehe auch Kapitel 3.2 und Kapitel 1) [28], [34], [98]–[103]. Insgesamt kann die aktuelle Generation an VR-Headsets daher als die bisher erfolgreichste betrachtet werden, der es zum ersten Mal gelungen ist, eine nennenswerte Etablierung am Markt zu erreichen.



Abbildung 3-6 VR-Brille Oculus Rift CV1 (Evan Amos, zugeschnitten und neu angeordnet aus [104] und [105], public domain)

Wie bereits beschrieben ist es mit modernen VR-Headsets möglich, sich in einem begrenzten Bereich auf natürliche Weise zu bewegen, indem die Bewegungen des Headsets (und damit die Nutzerposition) erfasst und in die virtuelle Welt übertragen werden. Die so erreichte natürliche Bewegung in der virtuellen Welt ist jedoch nur möglich, solange das zur Verfügung stehende reale Areal zur VR-Nutzung (*playspace*) größer oder gleich groß ist wie der virtuell simulierte Raum, der vom Nutzer durchlaufen werden soll. Sobald größere Areale simuliert werden sollen – oder wenn nur wenig realer Platz für die

VR-Verwendung zur Verfügung steht – ist daher der Einsatz künstlicher Bewegungsmethoden notwendig. Dabei handelt es sich um Möglichkeiten, die virtuelle Blickposition des Nutzers zu bewegen, ohne dass eine entsprechende reale Bewegung ausgeführt wird [41], [42], [59]. Auf diese Weise verschiebt sich der *playspace* in der virtuellen Welt und andere Teile des simulierten Areals werden begehbar. Die Verschiebung des *playspace* durch eine virtuelle Welt ist in Abbildung 3-7 dargestellt: Der Nutzer befindet sich in einer virtuellen Welt, der zu erreichende Zielpunkt liegt außerhalb des *playspace* – also des Bereichs, den der Nutzer durch natürliches Laufen erreichen kann. Durch Einsatz künstlicher Bewegungsmethoden verschiebt sich die Position des *playspace* innerhalb der virtuellen Welt, bis der Nutzer den Zielpunkt durch natürliches Laufen erreichen kann.

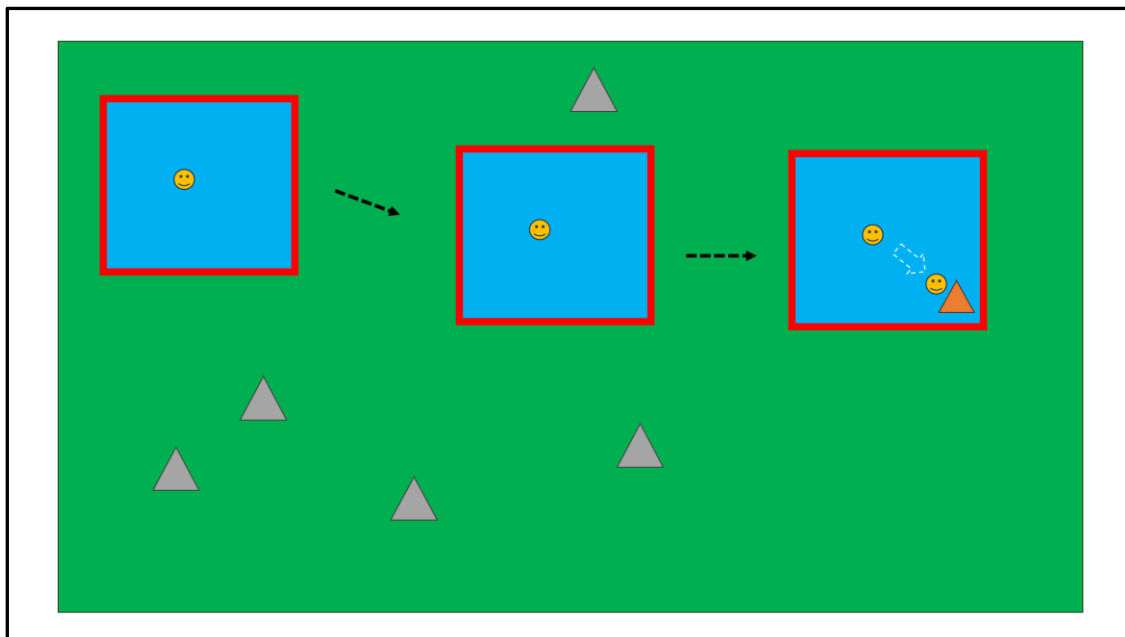


Abbildung 3-7 Bewegung in VR mittels Verschiebung des *playspace*:

Gelber Smiley = Nutzer, grün = virtuelle Welt, blau = *playspace*, rote Linie = Grenzen des *playspace*/mögliche Hindernisse in der realen Welt, graue Dreiecke = virtuelle Objekte, rotes Dreieck = Zielpunkt des Nutzers, schwarzer Pfeil = künstliche Bewegungsmethode, schwarzer Pfeil = Bewegung durch natürliches Laufen (eigene Darstellung).

Wie in Kapitel 1 beschrieben, existieren eine Vielzahl an – teils experimentellen – Methoden solche künstlichen Bewegungsmethoden umzusetzen. Ein Großteil der Ansätze lässt sich jedoch in eine von zwei Kategorien unterteilen: entweder wird der Blickpunkt des Nutzers von einem Moment auf den anderen von Punkt A zu Punkt B versetzt oder die Bewegung erfolgt graduell von Punkt A zu Punkt B, vergleichbar zu einer Kamerafahrt [41], [59]–[62]. Bewegungen, bei denen der Nutzer von einem Moment auf den

anderen an den Zielpunkt versetzt wird, werden in der Literatur meist als *Teleportation* bezeichnet [56], [59], [106]–[108]. Künstliche Bewegungsmethoden, bei denen eine graduelle Bewegung auf den Zielpunkt erfolgt, werden weniger einheitlich bezeichnet, z.B. als Controller-basierte Bewegung [56], [72], gesteuerte Bewegung [41], [109] oder „*Point locomotion*“ (deutsch etwa Zeige-Bewegung) [59]. Boletsis *et al.* schlagen in einer Literaturanalyse über künstliche Bewegungsmethoden in VR aus dem Jahr 2017 vor, Bewegungsmethoden in kontinuierliche und nicht-kontinuierliche Methoden zu unterteilen oder je nach verwendeter Interaktion zu bezeichnen, z. B. „Zeigen und Teleportieren“ oder „Controller/Joystick“ [61], [62]. Die Bezeichnungen vermischen folglich die simulierte Bewegung mit der durch den Nutzer erfolgten Interaktion. Für Klarheit wird in der vorliegenden Arbeit daher Teleportation für den plötzlichen Positionswechsel von Punkt A zu Punkt B verwendet, die graduelle Bewegung des Blickpunktes wird hingegen als Fließbewegung bezeichnet, da ein fließender Übergang von Punkt A zu Punkt B erfolgt.

3.2 Einsatz von Virtual Reality in der Medizin

Auch im medizinischen Bereich findet Virtual Reality zunehmend Anwendung. Wie in der Einleitung dargelegt kann VR beispielsweise genutzt werden, um 3D-Bildgebungsdaten wie MRT- oder CT-Aufnahmen realistisch darzustellen und besser räumlich erfassbar zu machen [14]–[18]. Forscher der Universität Basel entwickelten hierzu die Software „SpectoVive“ die es ermöglicht, CT-Daten automatisiert in ein 3D-Modell zu überführen das von einem Nutzer in VR betrachtet und manipuliert werden kann [16], [110]. Boedeker *et al.* stellten 2021 eine Software vor, die genutzt werden kann, um aus CT- oder MRT-Kontrastmittelaufnahmen einer Leber ein virtuelles Modell zu generieren. Dieses kann im Anschluss zur Operationsplanung in VR genutzt werden (Abbildung 3-8) [18].

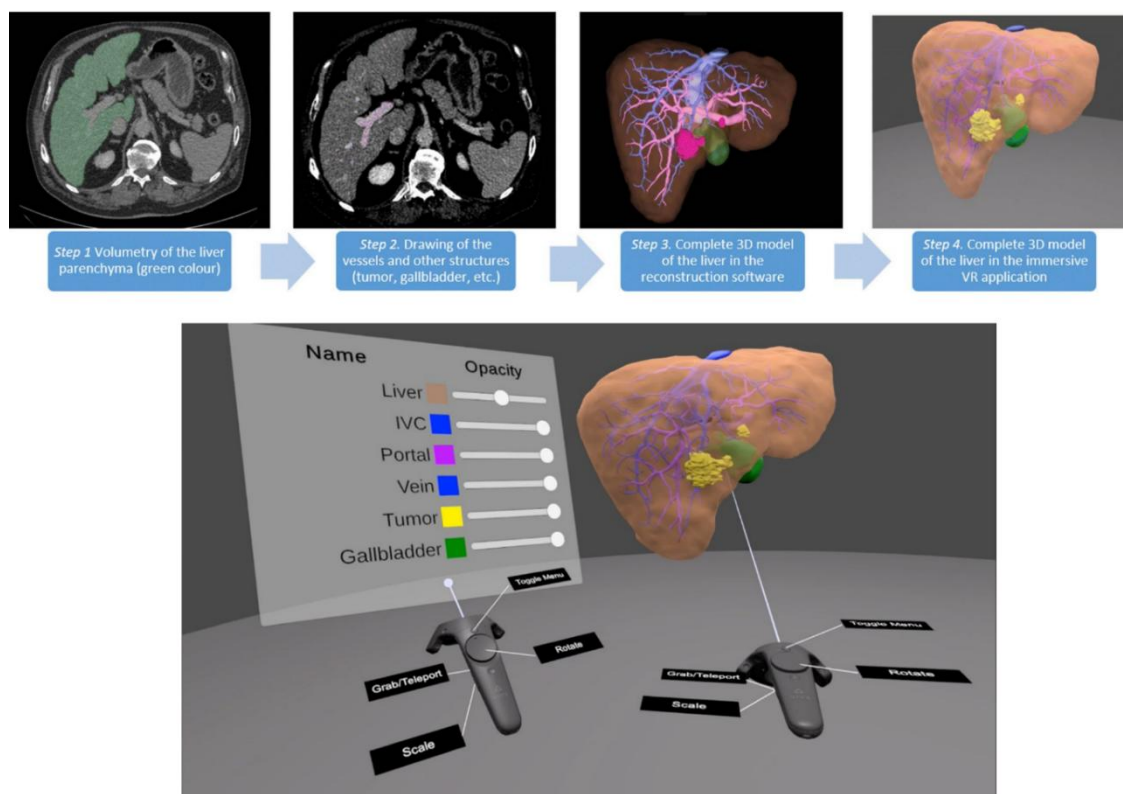


Abbildung 3-8 Rekonstruktion eines Lebermodells (oben) und Darstellung in VR (unten), Boedeker *et al.* zugeschnitten und neu angeordnet aus [18], lizenziert unter CC BY 4.0

Die neurochirurgischen Abteilungen von drei Kliniken in Mainz und Zürich setzten zwischen 2006 und 2015 ein VR-System zur Planung von chirurgischen Interventionen an Aneurysmen bei 105 Patienten ein und veröffentlichten 2016 eine Analyse über den Ein-

satz des Systems. Die Autoren kommen zu dem Ergebnis, dass VR die räumliche Erfassung der anatomischen Gegebenheiten verbessere und insbesondere weniger erfahrene Chirurgen von dem System profitierten [111]. Chen *et al.* verglichen 2020 die Ergebnisse von 32 Operationen an distalen Femurfrakturen. Es zeigte sich eine Verkürzung der Operationszeit, ein verminderter intraoperativer Blutverlust der Patienten, eine verringerte postoperative Verweildauer sowie eine Verringerung der Anzahl an intraoperativ notwendigen Röntgenaufnahmen [112]. 2023 kamen Laskay *et al.* in einer Metaanalyse über Studien zum Nutzen von VR-Anwendung in der präoperativen Planung zu dem Schluss, dass VR-unterstützte Operationsplanung in einer Vielzahl von chirurgischen Disziplinen zu besseren Patientenoutcomes führten [113]. Auch können OP-Simulationen in VR eingesetzt werden um die Ausbildung von Chirurgen zu unterstützen [114]–[118]. So untersuchten beispielsweise Grantcharov *et al.* 2004 die Operationszeit, Fehlerhäufigkeit und die beobachtete Sicherheit, mit der die Operationsschritte bei der Durchführung von Cholezystektomien (Entfernung der Gallenblase) ausgeführt wurden. Untersucht wurden 20 Assistenzärzte, die acht oder weniger dieser Eingriffe durchgeführt hatten. Sie konnten zeigen, dass sich alle der erfassten Parameter verbesserten, wenn die Probanden Trainingsoperationen in VR durchführten [119]. Weiterhin konnte von diversen Autoren gezeigt werden, dass VR-Anwendungen eine effektive Entlastung bei akuten sowie chronischen Schmerzpatienten bewirken können [24], [28], [120]–[122]. Auch in der Neurorehabilitation kommt VR zum Einsatz [27], [29], [123]–[125]. So untersuchten Kim *et al.* 2016 Schlaganfallpatienten, die während ihrer vierwöchigen Rehabilitationsbehandlung ein 30-minütiges VR-Training nach jeder Physiotherapiesitzung absolvierten. Sie konnten zeigen, dass diese Patienten nach vier Wochen eine wesentlich bessere Balance und Gangsicherheit zeigten als Patienten, die das VR-Training nicht absolvierten [123]. Auch in der Psychiatrie und Psychotherapie konnte für VR-Anwendungen positive Effekte in einer Vielzahl von Fällen gezeigt werden [22]–[26], [126]. Eine Reihe von Studien konnte zeigen, dass besonders in der Behandlung von Phobien ein großes Potential in VR-Anwendungen zu liegen scheint. So können beispielsweise Patienten mit Höhenangst einer VR-Umgebung ausgesetzt werden, die ihnen simuliert, an einem Abgrund zu stehen oder Patienten mit einer Angst vor Spinnen können mit virtuellen Spinnen konfrontiert werden [22], [25], [127]. Rimer *et al.* führten 2016 eine Studie über den Einsatz von simulierten Expositionsbehandlungen für Höhenangst und ihrer Akzeptanz unter Therapeuten durch.

Sie hoben in ihrer Arbeit hervor, dass ein Großteil der befragten Therapeuten es als einen Vorteil von VR ansahen, dass es den Aufwand einer Expositionsbehandlung reduziere und somit die Zugänglichkeit dieser Therapieform erhöhe [25].

3.3 Kinetose und Simulatorkrankheit

Wie in Kapitel 1 erwähnt, handelt es sich bei Kinetosen um einen Symptomkomplex, der vornehmlich im Zusammenhang mit ungewohnten Bewegungen auftritt [43], [47], [48], [128].

Die Ätiologie von Kinetosen wird in der Regel mit einem sogenannten sensorischen Konflikt (englisch *sensory mismatch*) erklärt: Die eigene Position und Bewegung im Raum zu erfassen, ist eine komplexe Aufgabe, für die der menschliche Körper mehrere Sinnesindrücke gleichzeitig erfasst und auswertet. So werden über den Gleichgewichtssinn Beschleunigungen und Rotationen in mehreren Achsen erfasst. Durch visuelle Wahrnehmung werden Bewegungsmuster wahrgenommen und Kontext über die Bewegungsinformation gewonnen. Unterstützt wird die Bewegungserfassung außerdem durch weitere Sinneseindrücke wie propriozeptive Signale aus den Muskeln. Die Gesamtheit der Signale wird synchron verarbeitet und mit Mustern aus bekannten Bewegungssituationen abgeglichen [43], [46]–[49], [74], [129], [130]. Im Normalfall ergänzen sich diese Informationen gegenseitig und ermöglichen so eine präzise Wahrnehmung von Eigen- und Fremdbewegungen. Widersprechen sich jedoch ein oder mehrere Signale, so spricht man von einem sensorischen Konflikt. Ein Beispiel ist das Lesen während einer Autofahrt. Hierbei wird visuell keine Bewegung erfasst (Blick auf das stillstehende Buch), das Gleichgewichtsorgan aber nimmt Beschleunigungs-, Brems- und Lenkbewegungen wahr und interpretiert diese als Bewegungen [43], [47]–[49], [130], [131].

Wenn eine Kinetose nicht durch eine reale Bewegung ausgelöst wird, sondern durch die Abwesenheit eines erwarteten Bewegungsreizes, so spricht man auch von einer Pseudokinetose (englisch *pseudomotion sickness*). Dies kann beispielsweise beim Spielen immersiver Computerspiele vorkommen, wenn visuell eine Bewegung auf dem Bildschirm zu erkennen ist, aber kein entsprechender Beschleunigungsreiz im Gleichgewichtsorgan registriert wird [132]. Auch existieren unterschiedliche Bezeichnungen, je nach auslösender Situation, wie z.B. Schiffskrankheit für das Auftreten von Symptomen während einer Schiffsreise, Luftkrankheit für Symptome während einer Flugreise oder Simulatorkrankheit für das Auftreten von Symptomen in Simulationsumgebungen [43], [53], [55], [133]. Grundsätzlich ist die Bezeichnung der verschiedenen Unterformen von Kinetosen jedoch nicht einheitlich. Kinetosen, die in VR-Umgebungen ausgelöst werden, bezeichnet man

in der Literatur beispielsweise als Simulatorkrankheit, Cyberkrankheit (englisch *cybersickness*), VR-Krankheit (englisch *VR-sickness*) oder auch einfach als Reisekrankheit (englisch *motion sickness*) [42], [56], [134]–[138]. In der vorliegenden Arbeit werden Symptome einer Kinetose in VR als Simulatorkrankheit (SK) bezeichnet.

Die auftretenden Symptome sind sehr variabel und unterscheiden sich zwischen verschiedenen Personen oft deutlich. Häufig auftretende Symptome beinhalten beispielsweise Schwitzen, Schwindel, Kopfschmerzen und Übelkeit (in starken Fällen auch bis zum Erbrechen). Weiterhin konnte gezeigt werden, dass Kinetosen mit zunehmender Symptomstärke die geistige Leistungsfähigkeit betroffener Personen akut reduzieren können [43], [47], [50], [68]–[70]. Historisch sind Kinetosen seit Jahrtausenden bekannt und bereits für simple Fortbewegungsarten wie Sänften oder handgezogene Wägen beschrieben [45], [46].

Die physiologische Bedeutung des Phänomens ist nicht vollständig geklärt. Ein häufig genannter Erklärungsansatz ist der, dass der Körper die widersprüchlichen Informationen (im Rahmen des sensorischen Konflikts) als Zeichen einer Vergiftung wertet. Für diese Theorie sprechen die Symptome, die in großen Teilen denen einer Vergiftung ähneln können als auch, dass Erbrechen in der Regel zu einer – zumindest kurzzeitigen Verbesserung der Symptome führen kann [39], [55], [139], [140]. Die These der „Vergiftungsannahme“ wird weiterhin dadurch gestützt, dass Hunde, denen das Gleichgewichtsorgan beidseitig entfernt wurde, weniger Anfälligkeit für vergiftungsinduzierte Übelkeit zeigen und dass Patienten mit einer hohen Anfälligkeit für Reisekrankheit auch stärker zu Übelkeit im Rahmen einer Chemotherapie neigen [141], [142].

Da es starke Unterschiede in der Anfälligkeit für Reisekrankheit zwischen Individuen gibt, werden eine Reihe von möglichen Einflussfaktoren in der Literatur diskutiert (siehe auch Kapitel 0). Dazu gehört zum einen die Art des Stimulus (beispielsweise in welcher Frequenz, Stärke und auf welcher Achse ein Schiff schwankt) zum anderen aber auch individuelle Faktoren wie das Geschlecht, eine Gewöhnung an die auslösende Situation (Habituation), das Alter der Person oder eine genetische Veranlagung [42], [43], [50], [143]–[145]. Auch scheinen Personen, die an Migräne leiden, anfälliger für Kinetosen zu sein [46], [146]–[149]. Tierversuche an Hunden und Fischen lieferten darüber hinaus Hinweise, dass Asymmetrien zwischen rechtem und linken Gleichgewichtsorganen mit einer höheren Anfälligkeit für Reisekrankheit einhergehen [150]–[152].

In der medikamentösen Therapie der Reisekrankheit stehen verschiedene Optionen zur Verfügung. Zwei häufig eingesetzte Wirkstoffe sind Antihistaminika und Scopolamin. Die Wirkung von Antihistaminika basiert auf einer Hemmung von H1-Rezeptoren in der Formatio reticularis, dem Brechzentrum des Gehirns und somit einer direkten Unterbindung der Symptomentstehung [43], [48], [133], [144]. Scopolamin hingegen wirkt auf muskarinerge Acetylcholinrezeptoren und schwächt dadurch Empfindungen des Gleichgewichtsorgans ab [48], [131], [153]. Eine wesentliche nichtmedikamentöse Akutmaßnahme ist das Unterbrechen des sensorischen Konfliktes. Im Falle von Lesen im Auto würde dies beispielsweise geschehen indem die betroffene Person das Lesen unterbricht und an stattdessen aus dem Fenster blickt, um die Informationen des Gleichgewichtsorgans und der Augen wieder in Einklang zu bringen [43], [50]. Langfristig ist durch wiederholte oder andauernde Exposition eine Gewöhnung an die auslösende Situation möglich (Habituation), die mit einer Verringerung der Symptome einhergeht. Dies geschieht beispielsweise auf einer längeren Schiffsreise, wenn sich Passagiere mit der Zeit an das Schwanken des Schiffs gewöhnen [43], [45], [48], [50], [133].

3.4 Fragebogenbasierte Erfassung von Simulatorkrankheit

Um die Symptome der Reisekrankheit genauer zu untersuchen, entwickelten Kennedy and Gabriel ab 1965 einen Fragebogen zur Symptomerfassung, den sogenannten *Motion Sickness Questionnaire* (MSQ). Der MSQ fragt das Vorhandensein von insgesamt 28 Symptomen wie allgemeines Unwohlsein, Kopfschmerzen, Schwitzen, Übelkeit und Erbrechen ab. Die vollständige Liste der Symptome ist in Abbildung 3-9 dargestellt [71], [154].

Um Kinetosesymptome in VR zu erfassen, wird typischerweise jedoch nicht der MSQ, sondern der *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ) verwendet [42], [63].

Der SSQ entstand 1993 als eine Weiterentwicklung des MSQ mit dem Ziel, diesen besser an Flugsimulatoren anzupassen, da man festgestellt hatte, dass sich die dort ausgelösten Symptome von denen einer Reisekrankheit in Schiff oder Auto unterschieden. Der Symptomkomplex wurde daher als Simulator Sickness, zu Deutsch Simulatorkrankheit bezeichnet [71].

Für die Entwicklung des SSQ untersuchten Kennedy *et al.* die MSQ-Ergebnisse von 1.119 Probanden der amerikanischen Luftwaffe an Flugsimulatoren und eliminierten Symptome, welche in der Simulationsumgebung in unter 1% der Fälle auftraten. Die 28 Fragen des MSQ konnten somit auf 16 Fragen reduziert werden, deren Stärke von den Probanden auf einer Skala von 1 - 4 (nicht vorhanden, etwas, deutlich, sehr stark) bewertet werden (Abbildung 3-9) ([71]).

Kennedy *et al.* gehen davon aus, dass sich drei verschiedene unabhängige Symptomkomplexe unterscheiden lassen, die als die Subskalen *Nausea*, *Oculomotor* und *Disorientation* (zu Deutsch etwa *Übelkeit*, *Augenmotorik betreffende Symptome* und *Desorientiertheit*) bezeichnet werden [71], [155]. Aus den berichteten Symptomen lassen sich daher drei entsprechende Subskalen (englisch *scores*) berechnen: ein *Nauseascore*, ein *Oculomotor-score* sowie ein *Disorientationscore*. Die Höhe des Scores soll dabei die Schwere des aufgetretenen Symptomkomplexes widerspiegeln. Weiterhin wird ein als *Totalscore* bezeichneter Gesamt-SSQ-Wert berechnet. Zur Berechnung der Subskalen werden die Symptome, die der jeweiligen Skala zugeordnet werden, aufaddiert und mit einem – für jede Subskala unterschiedlichen – Gewichtungsfaktor multipliziert. Zur Berechnung des *Totalscores* werden die Werte der Subskalen ohne Gewichtungsfaktor aufaddiert und die

resultierende Summe mit einem anderen Gewichtungsfaktor multipliziert (siehe Tabelle 3-1, Seite 28). Die Gewichtungsfaktoren dienen dazu, Werte zu schaffen, die in ihren Werten ähnliche Schweregrade an SK abbilden (Tabelle 3-1, Seite 28) [63], [71]. So werden Werte unter 5 auf jeder Skala als vernachlässigbare, zwischen 5 und 10 als minimale, zwischen 10 und 15 als signifikante und zwischen 15 und 20 als besorgniserregende Symptome gewertet. Oberhalb von 20 gilt der Simulator als „*Bad*“ (englisch wörtlich „schlecht“, in diesem Kontext könnte man es als „nicht zumutbar“ übersetzen) [155].

Kennedy *et al.* berichten, dass „Cyberkrankheit“ mit den höchsten Werten auf der Skala *Disorientation* und den niedrigsten auf der Skala *Oculomotor* einherginge [155]. Auch andere Autoren berichten für VR-Anwendungen von den höchsten Werten auf der Skala *Disorientation*, die Abstufung der Skalen *Oculomotor* und *Nausea* variiert jedoch [42], [65], [66], [156]–[158]

Der SSQ ist eines der meistverwendeten Instrumente zur Erfassung von SK in VR. Hirzle *et al.* kamen 2021 in einer Analyse über die Verwendung des SSQ zu dem Ergebnis, dass er der de facto Standard zur Untersuchung von Kinetosen in VR sei [78]. Auch andere Autoren beschreiben den SSQ als meistverwendetes Instrument für Erfassung von SK in VR [42], [63], [74]. Die Verwendung des Fragebogens ist Gegenstand von Diskussion. Hirzle *et al.* kritisieren an der Verwendung des SSQ für die Erfassung von SK in VR, dass der Fragebogen ursprünglich nicht für die Verwendung in VR entwickelt wurde und daher Faktoren abseits der Software wie eine Belastung der Augen durch den Bildschirm und Tragekomfort des Headsets nicht miterfasse [78]. Zudem wird von einigen Autoren die Aussagekraft der Subskalen angezweifelt, auch da Symptome teilweise mehreren Subskalen zugeordnet und dementsprechend stärker im Totalscore gewichtet werden [63], [78], [159].

Aufgrund der genannten Kritik gab es in den letzten Jahren Versuche, eigene VR-Fragebögen speziell für die durch VR ausgelöste SK zu entwickeln bzw. den SSQ für die Verwendung in VR abzuändern, wie beispielsweise Kim *et al.* die 2018 einen *Virtual Reality Sickness Questionnaire* (VRSQ) vorschlugen [76], [159]. Diese Alternativen konnten sich aber bisher nicht durchsetzen, sodass der SSQ sich – trotz der Kritik – als Standardinstrument für die Erfassung von SK in VR etabliert hat [42], [74], [76]–[78]. Daher wird der SSQ auch in dieser Arbeit verwendet, um die Testergebnisse der vorgeschlagenen

Software möglichst aussagekräftig mit den Ergebnissen anderer Forschungsgruppen vergleichen zu können.

Da der SSQ im Original in englischer Sprache vorliegt, wird für diese Studie die deutsche Übersetzung von Mehlitz *et al.* verwendet [137] (Anhang 1).

MSQ-Symptom	Deutsche Übersetzung nach Mehlitz	In SSQ übernommen?
General discomfort	Allgemeines Unwohlsein	x
Fatigue	Müdigkeit	x
Boredom		
Drowsiness		
Headache	Kopfschmerzen	x
Eyestrain	Überanstrengte Augen	x
Difficulty focusing	Schwierigkeiten beim Scharfsehen	x
Increased salivation	Erhöhter Speichelfluss	x
Decreased salivation		
Sweating	Schwitzen	x
Nausea	Übelkeit	x
Difficulty concentrating	Konzentrationsschwierigkeiten	x
Depression		
Fullness of head	Druckgefühl im Kopf	x
Blurred vision	Getrübtes Sehen	x
Dizziness (eyes open)	Schwindel geöffneten Augen	x
Dizziness (eyes closed)	Schwindel bei geschlossenen Augen	x
Vertigo	Drehschwindel	x
Visual flashbacks		
Faintness		
Awareness of breathing		
Stomach awareness	Wahrnehmung des Magens	x
Decreased appetite		
Increased appetite		
Desire to move bowels		
Confusion		
Burping	Aufstoßen	x
Vomiting		

Abbildung 3-9 Symptomvergleich MSQ und SSQ (eigene Darstellung, nach Kennedy *et al.*, 1993 und Mehlitz)

		Subskalen	
SSQ Symptom	Nausea	Oculomotor	Disorientation
Allgemeines Unwohlsein	1	1	
Müdigkeit		1	
Kopfschmerzen		1	
Überanstrengte Augen		1	
Schwierigkeiten beim Scharfsehen		1	1
Erhöhter Speichelfluss	1		
Schwitzen	1		
Übelkeit	1		1
Konzentrationsschwierigkeiten	1	1	
Druckgefühl im Kopf			1
Getrübtes Sehen		1	1
Schwindel geöffneten Augen			1
Schwindel bei geschlossenen Augen			1
Drehschwindel			1
Wahrnehmung des Magens	1		
Aufstoßen	1		
Gesamt	N	O	D

Skalenberechnung

Nausea **N** x 9,54
 Oculomotor **O** x 7,58
 Disorientation **D** x 13,92
 Totalscore **(N + O + D) x 3,74**

Tabelle 3-1 Berechnung der Subscores sowie des Totalscores des SSQ (eigene Darstellung nach Bimberg, Weissker and Kulik, 2020 und Mehlitz, 2004).

3.5 Eingesetzte Hardware

Zur Versuchsdurchführung wurde das VR-System *HTC Vive* der Firma HTC eingesetzt. Die Auswahl des Systems erfolgte vor allem deshalb, weil es zum Zeitpunkt der Versuchsplanung als erstes VR-System im Endkundenbereich die Möglichkeit bot, eine Bewegungserfassung in einem Areal durchzuführen, welches reales Umherlaufen erlaubte. Hierdurch wurde die angedachte Funktionsweise der Software möglich, natürliches Laufen mit künstlichen Bewegungsmethoden zu vergleichen [11], [13], [58].

Das Kernstück des Systems bildet eine VR-Brille, die wie eine Skibrille über den Kopf des Nutzers gezogen wird. In diesem Gestell befinden sich zwei hochauflösende Bildschirme für die Bilddarstellung. Vor diesen befinden sich Linsen, um das Bild für den Nutzer zu fokussieren und so zu krümmen, dass ein möglichst natürliches Sichtfeld entsteht. Weiterhin befinden sich mehrere Sensoren an und in dem Headset, um Kopfbewegungen des Nutzers zu erfassen sowie die Position des Headsets im Raum zu bestimmen [11], [81]. Zur Nutzerinteraktion werden zwei Controller eingesetzt (Abbildung 3-10 Mitte), welche ebenfalls über Sensoren zur Positions- und Bewegungserfassung verfügen. Die Positionsbestimmung erfolgt mit Hilfe zweier Laserstationen, genannt *lighthouses* (Abbildung 3-11). Dabei handelt es sich um zwei kleine schwarze Kästen, die diagonal gegenüberliegend an den Ecken des Bereichs platziert werden, der für die VR-Simulation verwendet werden soll. Nach ihrer Inbetriebnahme spannen die *lighthouses* ein für das menschliche Auge unsichtbares (und unbedenkliches) Laserraster über den Raum [160], [161]. Mehrere Sensoren an der VR-Brille sowie an den Controllern erlauben es, anhand der „Lasermarkierungen“ die Position der Geräte mit äußerst niedriger Latenz zu bestimmen (Abbildung 3-12) [10], [13], [58]. Niehorster *et al.* kamen in einer Versuchsreihe 2017 zu dem Schluss, dass die obere Grenze der Systemlatenz des *HTC Vive* (also der längsten Zeitspanne zwischen Start einer Bewegung und der Darstellung des korrespondierenden Bildes) bei etwa 22ms liege [58]. Durch den maximalen diagonalen Abstand von 5m zueinander ergibt sich eine theoretische maximale Raumgröße von ca. 12m², die für VR genutzt werden kann [10], [162]. Ethan Luckett analysierte 2018 die Genauigkeit des *lighthouse*-Systems und kam zu dem Ergebnis, dass die maximale Abweichung in der Genauigkeit des Systems – bei Verwendung innerhalb der Herstellerspezifikationen – bei etwa 5mm lag und die Genauigkeit mit wesentlich teureren Positionserfassungssystemen vergleichbar sei [13].

Die *HTC Vive* unterstützt die offene Softwareschnittstelle *OpenXR* (früher *OpenVR*). Dies bedeutet, dass Software, die für das System entwickelt wird, nicht auf die Verwendung mit diesem VR-System beschränkt ist, sondern auch mit anderen Headsets verwendet werden kann, die die Schnittstelle unterstützen [163]–[166].

Die Bildberechnung des VR-Headset erfolgt über einen Computer, welcher mit einer Nvidia GeForce GTX1080Ti als Grafikkarte, einem Intel Core i7 8700K als Prozessor sowie 32GB Arbeitsspeicher ausgestattet war. Dies lag deutlich oberhalb der empfohlenen Systemanforderungen des Headsetherstellers und der zu erwartenden Anforderungen durch die Software [167]. Die Hardware wurde bewusst überdimensioniert, um zu vermeiden, dass während der Versuchsdurchführung Einbrüche der Bildrate durch zu leistungsschwache Hardware auftreten.



Abbildung 3-10: „HTC Vive“ Virtual Reality Headset (rechts) mit Controllern (Mitte), sowie das eingesetzte Computersystem (links) (eigene Darstellung)



Abbildung 3-11 *lighthouse* Positionserfassung (eigene Darstellung)

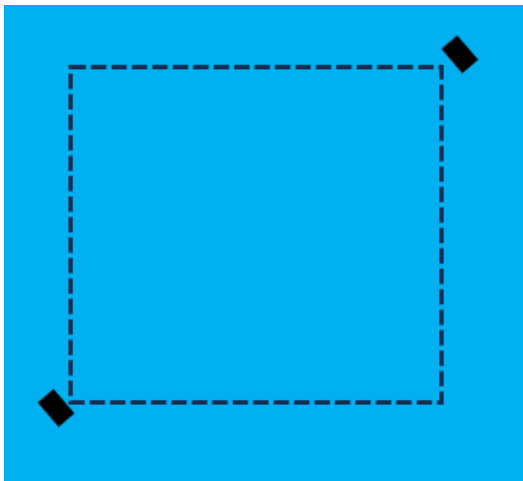


Abbildung 3-12 Aufstellung der *lighthouses*: dargestellt sind *lighthouses* (schwarze Vierecke) die gegenüberliegend aufgestellt sind. Zwischen diesen ist ein gestrichelt dargestellter, kleinerer Bereich eingemessen, der den Bereich darstellt, der für die VR-Nutzung verwendet werden kann (playspace) (eigene Darstellung).

3.6 Nutzerspezifische Einflussfaktoren

Wie unter 3.3 angesprochen werden in der Literatur eine Reihe von Einflussfaktoren auf die Auftretenswahrscheinlichkeit bzw. Symptomschwere von Kinetosen im Allgemeinen bzw. SK im Speziellen diskutiert [42], [53]. Um zu analysieren, ob sich diese bekannten oder vermuteten Unterschiede auch in der hier vorgeschlagenen Software im Rahmen des durchgeführten Versuchsablaufs nachweisen lassen, wurden die folgenden Aspekte der Probanden vor Versuchsbeginn erfasst:

3.6.1 Alter

Zum Effekt des Alters auf die Entstehung von SK bzw. Kinetosen gibt es widersprüchliche Ergebnisse in der Literatur. Meist wird jedoch berichtet, dass ältere Personen weniger anfällig für SK seien [42], [52], [64], [157]. So beschrieben Reason und Brand 1975, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit für Kinetosen mit fortschreitendem Alter grundsätzliche sinke [128]. 2005 berichteten Arns und Cerney jedoch, dass in VR ein Gipfel der Anfälligkeit für SK um das 12te Lebensjahr zu beobachten sei, nachdem die Anfälligkeit mit steigendem Alter zunächst sinke, bei Personen über 50 jedoch wieder zunehme [157]. Saredakis *et al.* beschrieben in einer Metastudie über SK in verschiedenen VR-Szenarien wiederum geringere SSQ-Werten bei älteren Probanden, wiesen in ihrer Arbeit jedoch explizit darauf hin, dass diese Ergebnisse durch die in den Studien verwendeten Testumgebungen verfälscht sein könnten [42].

3.6.2 Geschlecht

Ein möglicher Einfluss des Geschlechts auf die Entstehung von SK bzw. Kinetosen im Allgemeinen ist in der Literatur Gegenstand von Diskussion ohne klaren Konsens. In einigen Studien werden klare Geschlechterunterschiede, mit meist höheren Anfälligkeiten für weibliche Probanden, berichtet [64], [65], [137], [145], [168], [169]. Es existieren jedoch auch gegensätzliche Ergebnisse, bei denen kein Effekt für das Geschlecht nachgewiesen werden konnte [72], [109], [170], [171]. Für diesen möglichen Effekt werden eine Reihe an Erklärungsansätze ohne klaren Konsens in der Literatur diskutiert. Unter anderem wird ein Einfluss von hormonellen Faktoren diskutiert, ob männliche Probanden

dazu neigen Symptome als geringer anzugeben oder auch ob eine höhere Anfälligkeit für Frauen einen Selektionsvorteil darstellt, bzw. historisch darstellte [52], [64], [169]. Auch ein Zusammenhang zwischen Migräne und einer erhöhten Anfälligkeit für Kinetosen wird in der Literatur diskutiert. Da Frauen häufiger als Männer an Migräne leiden, könnte dies einen möglichen Effekt zumindest in Teilen erklären [46], [146]–[148], [172].

3.6.3 Sportliche Aktivität

In der Literatur wird über einen möglichen Zusammenhang zwischen körperlicher Fitness sowie der Anfälligkeit für Kinetosen diskutiert und meist eine höhere Anfälligkeit bei Personen mit höheren Fitnessleveln berichtet [173]–[176]. Als möglicher Erklärungsansatz wird angeführt, dass Sportler aufgrund ihrer größeren Vertrautheit mit Bewegungen im allgemeinen eine genauere Erwartungshaltung an die zu erwartenden Sinneseindrücke durch Bewegungsimpulse entwickeln und in der Folge empfindlicher auf einen sensorischen Konflikt reagieren [173]. Zudem wird diskutiert, ob trainingsbedingte Veränderungen des ACTH-Spiegels die Anfälligkeit für Kinetosen beeinflussen [176]. Probanden der vorliegenden Studie wurden daher befragt, wie viele Stunden sie pro Woche Sport betreiben.

3.6.4 Videospielkonsum

Virtual Reality unterscheidet sich in seiner Präsentation und seinem Erleben von „klassischen“ Computerspielen. Munafo *et al.* diskutierten 2016, dass es unwahrscheinlich sei, dass eine höhere Erfahrung mit Computerspielen zu einer geringeren Anfälligkeit für SK in VR führe [171]. Im Fall der hier getesteten Bewegungsmuster wäre ein Effekt aber denkbar, da vor allem die Bewegungsmethode der *Fließbewegung* im Wesentlichen dem entspricht, wie sich auch in vielen Computerspielen aus der Ich-Perspektive fortbewegt wird. Es wäre entsprechend nicht auszuschließen, dass die Bewegungsmethoden für Probanden mit Computerspieleerfahrung vertrauter sind und dies eventuell mit geringeren SSQ-Scores einhergeht. Die Probanden wurden daher befragt, wie viele Stunden sie pro Woche Videospiele spielen.

3.6.5 Vorerfahrung mit VR-Systemen

Für andere Formen der Kinetose – wie Seekrankheit – ist bekannt, dass es einen starken Gewöhnungseffekt (Habituation) gibt, der die Anfälligkeit für diese deutlich senkt [50].

Dieser Effekt scheint auch für Simulationsumgebungen und VR zu bestehen [39], [177]. Um einen orientierenden Eindruck davon zu erhalten, ob VR-Erfahrung einen Einfluss auf die Verträglichkeit der künstlichen Bewegungsmethoden zeigt, wurden die Probanden hinsichtlich ihrer VR-Vorerfahrung befragt und in Erfahrungsgruppen eingeteilt. Die Unterteilung erfolgte je nachdem, ob die Probanden VR noch gar nicht, 1–2-mal oder öfter verwendet hatten und ob die Erfahrung mit VR-Systemen mit oder ohne Positionserfassung bestand.

3.6.6 Selbsteinschätzung bezüglich der Anfälligkeit für Reisekrankheit

Die Probanden wurden um eine Selbsteinschätzung über ihre Anfälligkeit für Kinetosen in anderen Situationen gebeten. Hierfür wurden ihnen drei Situationen, in denen häufig Reisekrankheit auftritt, geschildert, die sie auf einer Skala von 1 (sehr schwach) bis 5 (sehr stark) beurteilen sollten. Die geschilderten Situationen waren:

1. Auf Schiffen
2. In anderen Verkehrsmitteln (Auto, Flugzeug, Bus, etc.)
3. Bei „Rummelplatzattraktionen“
4. Bei Videospielen

Die Probanden wurden angewiesen, die Felder nur für die Situationen anzukreuzen, die sie auch bereits erlebt hatten und Felder, die ihnen unbekannte Situationen beschrieben, leer zu lassen.

3.6.7 Vorhandensein von Fehlsichtigkeit

Die Probanden wurden über das Vorliegen sowie gegebenenfalls Stärke und Art einer Fehlsichtigkeit befragt. Tai *et al.* berichten in einer Studie von 2022, dass eine höhere Anfälligkeit für Nebenwirkungen von VR-Anwendungen bei Nutzern mit einer Fehlsichtigkeit bestehe, nannten allerdings keine Quelle für diese Annahme [178]. Dem Autor dieser Arbeit sind keine weiteren Quellen bekannt, die einen Zusammenhang zwischen Fehlsichtigkeit und Kinetosen belegen. Aus mehreren Gründen erschien eine Abfrage aber dennoch sinnvoll: Innerhalb der eingesetzten VR-Brille *HTC Vive* ist der vorhandene Platz begrenzt, weshalb zu Beginn des Tests unklar war, ob fehlsichtige Teilnehmer in der Lage sein würden, ihre Brillen unter dem Headset zu tragen. Weiterhin wäre es denkbar, dass die zusätzliche Brille innerhalb der VR-Brille zu Problemen führt (z.B. durch Verrutschen), die wiederum das Auftreten von SK-Symptomen beeinflussen könnten.

Umgekehrt wäre auch nicht auszuschließen, dass Probanden mit einer starken Fehlsichtigkeit es mehr gewohnt sind mit fehlerhaften visuellen Reizen konfrontiert zu werden als normalsichtige Personen und dies die Anfälligkeit für SK herabsetzt. Abgefragt wurde daher, ob eine Fehlsichtigkeit vorliegt, wenn ja, welcher Art und Stärke und ob diese korrigiert worden ist (Kontaktlinse, Brille). Sofern es sich um Brillenträger handelte, wurde außerdem vermerkt, ob der Versuch mit Brille durchgeführt werden konnte.

3.6.8 Weitere Fragen

Außerdem wurden die Probanden zu folgenden Aspekten befragt:

- Vorhandensein chronischer Erkrankungen
- Medikamenteneinnahme
- ggf. Schwangerschaftsstatus

Diese drei Aspekte dienten nicht der Datenerfassung, sondern um sicherzustellen, dass keine Probanden in die Studie eingeschlossen wurden, die eines der Ausschlusskriterien (siehe 3.9) erfüllten.

3.7 Softwareentwicklung

Wie bereits dargelegt, existieren eine Reihe von Einflussfaktoren, die die Auftretenswahrscheinlichkeit von SK-Symptomen bei der Verwendung von VR beeinflussen können. Insbesondere die dargestellte virtuelle Umgebung bzw. die Art der verwendeten Software scheinen wesentliche Einflussfaktoren zu sein [42], [74]. Daher soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit – wie in Kapitel 2 beschrieben – eine eigene Testplattform entwickelt werden, die es ermöglicht, den Effekt, den künstliche Bewegungsmethoden auf das Auftreten von SK-Symptomen in VR haben, möglichst isoliert zu betrachten. Hierzu soll die Software die Möglichkeit bieten, künstliche Bewegungsmethoden direkt mit Fortbewegung durch natürliches Laufen zu vergleichen. Ein Fokus wird daraufgelegt, Interaktionen der Nutzer einfach zu halten und die Testumgebung neutral und wenig aufregend zu gestalten. Dies sollte nach Saredakis *et al.* zu einer besseren Verträglichkeit der Software beitragen [42]. Zum Zeitpunkt der Entwicklung verfügte die gewählte Entwicklungsumgebung (siehe Kapitel 3.7.2) zwar bereits über rudimentäre Möglichkeiten bzw. Vorlagen zur Integration von Fließbewegung und *Teleportation* [179]. Bei eigenen Tests zeigte sich jedoch, dass diese Vorlagen an mehreren Stellen mit zusätzlichen Einblendungen arbeiteten. So wurden beim Einsatz von *Teleportation* beispielsweise Einblendungen angezeigt, die dem Nutzer helfen sollen, seine Zielposition zu bestimmen (siehe Abbildung 3-13). Da nicht ausgeschlossen werden konnte, ob diese unnatürlichen Einblendungen den Nutzer desorientieren und die Ergebnisse potenziell verfälschen, wurde die Entscheidung getroffen, die Bewegungsmethoden in einer minimalistischeren Form von Grund auf neu zu implementieren. Im Folgenden sind wesentliche Schritte und Herausforderungen der Softwareentwicklung beschrieben.

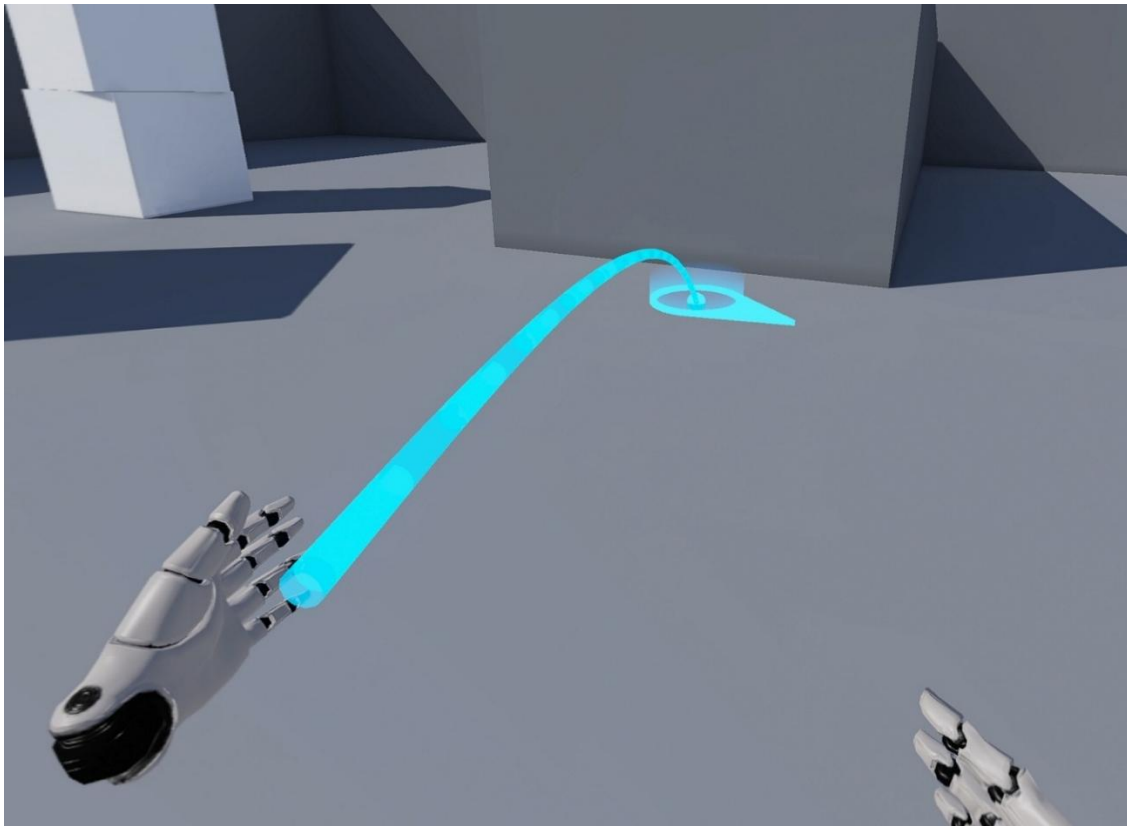


Abbildung 3-13 - Standardimplementation von Teleportation in *Unreal Engine 4* mit Hilfsanzeigen (Zielbereich und Teleportationspfad) (eigene Darstellung)

3.7.1 Planung der Softwareentwicklung

Seit dem Ende der 1960er Jahre hat es sich in der Softwareentwicklung zunehmend etabliert, sogenannte Softwareentwicklungsmodelle zu nutzen. Vereinfacht gesagt, handelt es sich dabei um einen Plan, der vor Beginn der eigentlichen Entwicklung angelegt wird, um die einzelnen Schritte der Softwareentwicklung zu strukturieren [180]. Es existieren eine Vielzahl verschiedener Entwicklungsmodelle mit stark unterschiedlicher Komplexität.

Eines der ältesten Softwareentwicklungsmodelle ist das sogenannte Wasserfallmodell. Es handelt sich dabei um ein sequenzielles Entwicklungsmodell, was bedeutet, dass festgelegte Schritte nacheinander abgearbeitet werden (siehe Abbildung 3-14). Zunächst werden im Wasserfallmodell die Anforderungen definiert und (schriftlich) festgehalten. Im Anschluss wird eine Systemarchitektur, bestehend aus Hardware und Software, getrennt

festgelegt. Die einzelnen Systemkomponenten werden implementiert, getestet und zu einem System zusammengeführt (integriert) und nach erneuten Tests des Gesamtsystems in Betrieb genommen und ggf. gewartet [180], [181].

Das Wasserfallmodell wurde für die vorliegende Arbeit gewählt, da es besonders übersichtlich ist und einen recht einfachen Entwicklungsprozess darstellt. Im vorliegenden Fall wird die Entwicklung von einem einzelnen Entwickler (dem Autor) übernommen, es ist also z.B. keine Abstimmung mit mehreren Teams notwendig und die Anforderungen sind ebenfalls durch den Autor definiert. Komplexere Entwicklungsmodelle fügen oft Möglichkeiten hinzu, um im weiteren Entwicklungsverlauf auf geänderte Anforderungen zu reagieren, Kommunikationslücken in Teams zu schließen oder einzelne Teile komplexer Software als Module zu entwickeln [180], [182], [183]. Die Wahl des Modells erfolgte also nach den Kriterien, dass es in der Lage ist den Entwicklungsprozess angemessen abzubilden, die Planung jedoch nicht durch übermäßige Komplexität verkompliziert.

Im konkreten Anwendungsfall wurden zunächst die Anforderungen in einem Lastenheft fixiert (Anhang 2). Dabei handelt es sich um ein Dokument aus dem Projektmanagement, mit dem Anforderungen an eine Software verbindlich festgelegt werden können, um Missverständnisse im Entwicklungsprozess zu vermeiden (für die festgelegten Anforderungen siehe auch Kapitel 3.7.3) [184], [185]. Auf Basis dieser Anforderungen wurden die geeignete Hardware (*HTC Vive*, siehe Kapitel 3.5) und Softwareumgebung (*Unreal Engine 4*, siehe 3.7.2) gewählt und die einzelnen Softwarekomponenten wie z.B. die Bewegungsmethoden implementiert und getestet. Danach erfolgte ein Testlauf des Systems, um die korrekte Funktion zu validieren und als letzter Schritt die Inbetriebnahme im Rahmen der durchgeführten Studie.

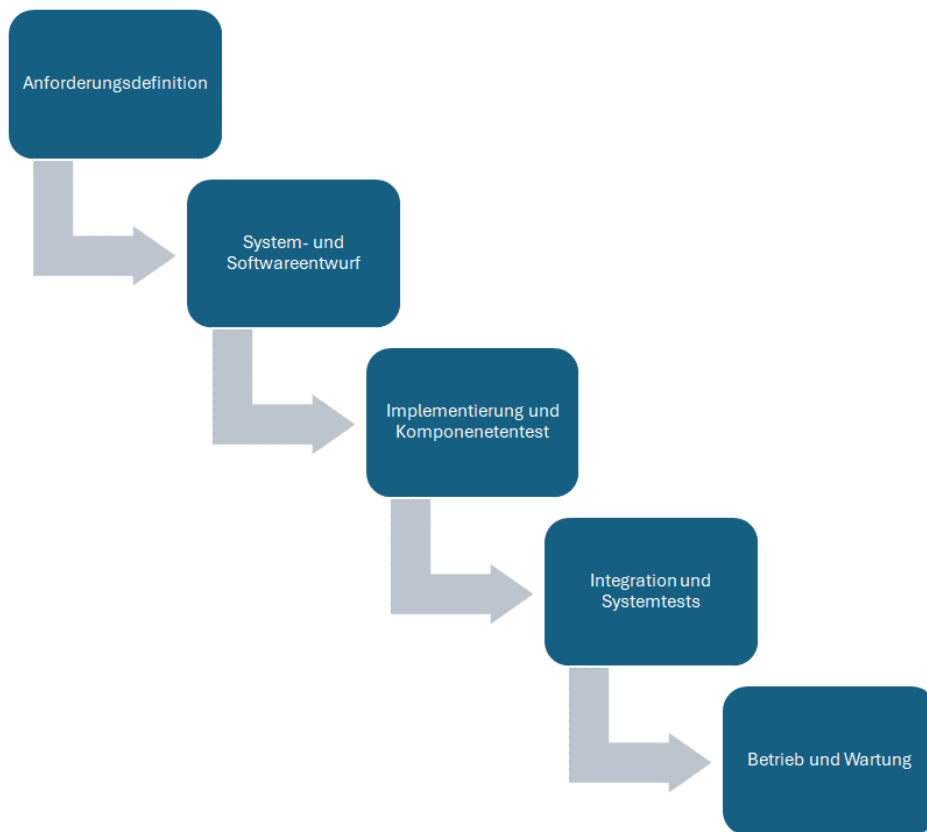


Abbildung 3-14 Wasserfallmodell nach Scharch, 2016 [180] (eigene Darstellung)

3.7.2 Entwicklungsumgebung

Zur Softwareerstellung wurde die Entwicklungssoftware *Unreal-Engine 4* in den Versionen 4.11 sowie 4.18 verwendet. Mit dieser können 3D-Anwendungen wie auch Computerspiele erstellt werden. Zum Zeitpunkt der Entwicklung war die Software eine der wenigen, die bereits eine vergleichsweise optimierte Einbindung von VR-Headsets ermöglichte [179], [186], [187]. *Unreal Engine* verwendet Codeblöcke (genannt *Blueprints*), die es ermöglichen, Programmänderungen vorzunehmen ohne textbasierten Code zu schreiben. Dabei können Aufgabenblöcke innerhalb der *Blueprints* verteilt werden, welche von der Software in den eigentlichen Programmcode umgewandelt werden. Dies sollte es in Zukunft für andere Nutzer mit geringen Programmierkenntnissen vereinfachen die Software weiter anzupassen [186], [187]. *Unreal Engine 4* implementiert die offene Softwareschnittstelle *OpenXR*. Das bedeutet, dass die entwickelte Software nicht nur mit dem in der vorliegenden Studie eingesetzten *HTC Vive*-Headset verwendet werden kann, sondern auch mit anderen VR-Headsets, die *OpenXR* unterstützen [18], [164], [165], [188].

3.7.3 Anforderungen des Lastenhefts

Wie in Einleitung und Zielsetzung dargelegt, wird für die vorliegende Studie eine Softwareneuentwicklung benötigt, die eine bessere Unterscheidung zwischen SK-Symptomen unterschiedlicher Herkunft ermöglicht: einerseits den durch künstliche Bewegungsmethoden ausgelösten Symptomen und andererseits denen, die durch das VR-System selbst bzw. durch die dargestellte Umgebung verursacht werden. In einem Lastenheft (Anhang 2) wurden hierzu die Anforderungen an die Software festgelegt.

Die Software soll insbesondere die Möglichkeit bieten, künstliche Bewegungsmethoden direkt, unter gleichen Bedingungen mit Fortbewegung durch natürliches Laufen zu vergleichen. Da es sich bei natürlichem Laufen um keine künstliche Bewegungsmethode handelt, sollten durch diesen Vergleich Symptome abgegrenzt werden können, die durch andere Faktoren wie das verwendete VR-System oder die dargestellte Umgebung verursacht werden. Die dargestellte Umgebung soll sich reizarm präsentieren und daher einen minimalistisch gestalteten Raum umfassen. Nutzeraktionen, die über Laufen und Umsehen hinausgehen, sollen auf ein Minimum reduziert werden, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass komplexere Nutzeraktionen einen zusätzlichen Stressor für Probanden darstellen könnten. Wie in der Einleitung beschrieben, stellten auch Saredakis *et al.* fest, dass bestimmte Arten von Software eher zu einem verstärkten Auftreten von SK-Symptomen führen. Die Autoren geben keine direkten Anweisungen, wie möglichst wenig SK-auslösende Software gestaltet werden sollte. Ihre Ergebnisse legen jedoch nahe, dass eine möglichst reizarme Umgebung mit wenig und möglichst simplen Nutzeraktionen am verträglichsten ist [42].

Gefordert wurde eine Testsoftware, die es ermöglicht fünf verschiedene Bewegungsmethoden in VR zu testen, indem der Nutzer mehrere Punkte in einem virtuellen Testraum abläuft. Folgende Bewegungsmethoden sollten integriert werden:

Natürliche Bewegung, bei der der Nutzer auf natürliche Weise real umherläuft und die Bewegungen in die virtuelle Welt übertragen werden,

Fließbewegung aktiv bei der der virtuelle Blickpunkt des Nutzers sich flüssig vorwärtsbewegt und die Bewegung durch den Nutzer kontrolliert wird, sowie

Teleportation, bei der die Kameraposition des Nutzers sich von einem Moment auf den anderen zu einem Zielpunkt bewegt.

Zusätzlich sollten noch zwei Abwandlungen von *Fließbewegung* implementiert werden:

Fließbewegung passiv, bei der der Nutzer keine Kontrolle über die Bewegung hat und

Fließbewegung passiv mit Schräge, bei der zusätzlich eine vertikale Bewegungskomponente implementiert wird.

Teleportation und *Fließbewegung* wurden gewählt, da es sich um zwei der am häufigsten verwendeten künstlichen Bewegungsmethoden in VR handelt, die auch gleichzeitig die Basis für viele experimentelle Bewegungsmethoden darstellen [61], [62]. *Fließbewegung passiv* wurde gewählt, um zu untersuchen, ob ein Unterschied zwischen aktiver und passiver Bewegung erkennbar ist. In der Literatur werden in der Regel stärkere Symptome für passive Bewegungen beschrieben [42], [43], [131], [136], [189], [190]. *Fließbewegung passiv mit Schräge* sollte implementiert werden, um zu testen, ob vertikale Bewegungen (z.B. beim Verwenden einer virtuellen Treppe) einen Einfluss auf das Auftreten von SK zeigen.

Die Tests der Bewegungsmethoden sollen umgesetzt werden, indem der Reihe nach auf dem Boden befindliche Zielpunkte abgelaufen werden. Die Reihenfolge der Zielpunkte soll in allen Testdurchläufen gleich sein, um eventuelle Verfälschungen durch unterschiedliche Laufrichtungen zwischen den Testdurchläufen zu vermeiden. Die Gesamtversuchszeit sollte etwa 15 Minuten betragen, da andere Arbeiten Hinweise darauf lieferten, dass bei Versuchszeiten von über 20 Minuten potentielle Verfälschungen durch die Versuchsdauer zunehmen [39], [42], [191][39].

3.7.4 Umsetzung von Raumgrenzen

Wenn ein Nutzer ein VR-Headset trägt, ist er durch das Headset nicht in der Lage, den realen Raum um sich herum zu sehen. Entsprechend läuft er grundsätzlich Gefahr, mit realen Hindernissen oder Wänden zu kollidieren, wenn er in der virtuellen Welt umherläuft. Um dies zu verhindern, gibt die verwendete VR-Software üblicherweise eine Warnung aus, wenn sich ein Nutzer den Grenzen des Bereichs nähert, der für die Verwendung in VR eingemessen wurde (*playspace*). Diese Warnung wird z.B. durch Darstellung eines im Raum schwebenden Gitters oder Wand umgesetzt, welches nur sichtbar ist, wenn der Nutzer sich nahe den Grenzen des *playspace* befindet und wird ansonsten ausgeblendet. Diese Grenzen werden auch als *chaperone* bezeichnet (Abbildung 3-15) [192]–[196].

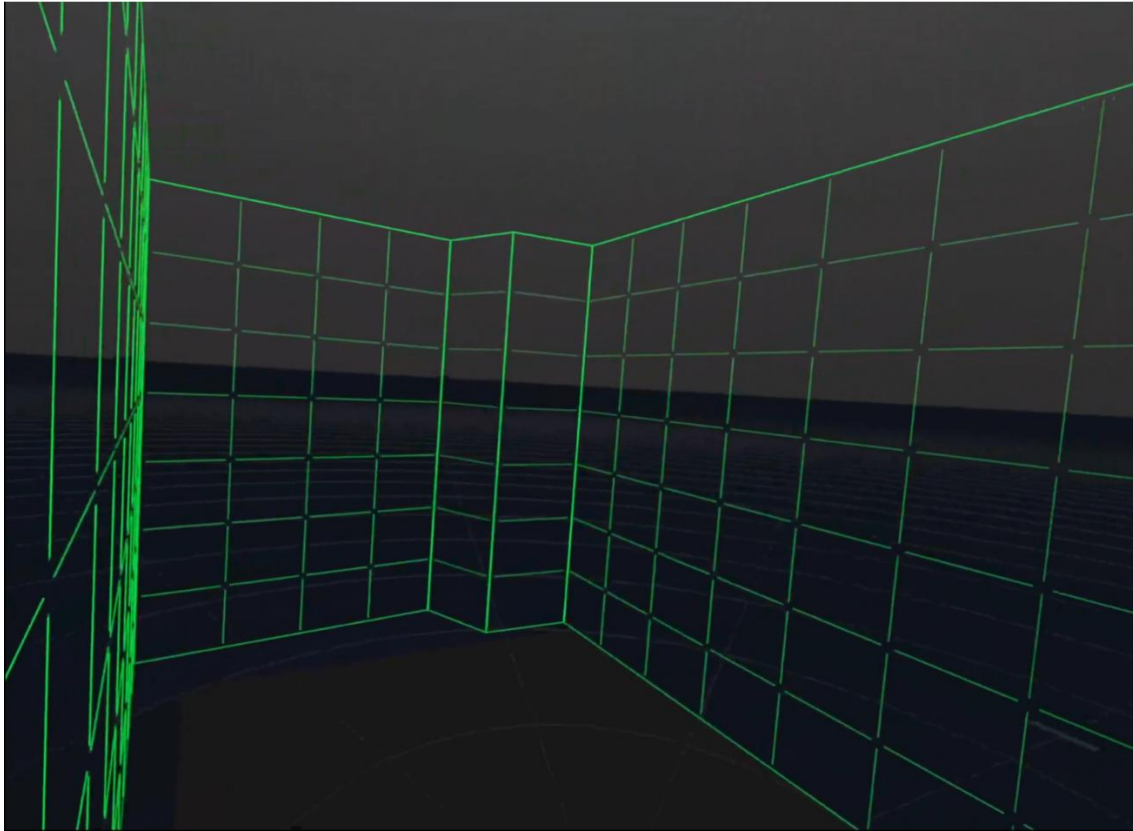


Abbildung 3-15 Virtuelle Raumgrenzen am Beispiel der *chaperone*-Grenzen (eigene Darstellung)

Problematisch für die Softwareentwicklung ist daran, dass nicht ausgeschlossen werden kann, ob dieses Gitter selbst eine mögliche Desorientierung der Nutzer auslöst, da es sich um ein plötzlich vor dem Nutzer schwebendes unnatürliches Phänomen handelt. Chang *et al.* berichteten in einer Studie 2020, dass Referenzpunkte, die während einer virtuellen Bewegung eingeblendet werden, die Auftretenswahrscheinlichkeit von SK sogar senken können [74]. Dies bedeutet, dass virtuelle Grenzen das Potential haben, die Ergebnisse zu beeinflussen, besonders wenn ein Proband – während der Verwendung einer der künstlichen Bewegungsmethoden – nah an den Grenzen des *playspace* stehen würde (und dementsprechend die *chaperone*-Grenzen eingeblendet würden).

Um dies zu verhindern, wurde auf die Darstellung von künstlichen Raumgrenzen verzichtet und die entsprechenden Funktionen deaktiviert. Da sich zu jeder Zeit während der Versuchsdurchführung ein Studienleiter mit dem Probanden im Raum befindet, wären sie theoretisch nicht erforderlich, da ein Proband so auch verbal gewarnt werden könnte, falls dieser sich einem realen Hindernis oder physischen Raumgrenzen nähert. Dies birgt je-

doch ein nicht unerhebliches Verletzungsrisiko, sollte der Versuchsleiter abgelenkt werden oder für einen Moment unaufmerksam sein. Daher wurde anstatt dessen ein virtueller Raum dargestellt, der in seinen Maßen dem angedachten Testareal entspricht. Somit wird der virtuelle Raum durch real aussehende Wände begrenzt, die in der virtuellen Umgebung verankert sind und keinen Bruch der Illusion herbeiführen sollten. Es wird folglich mit keiner abstrahierten Version von Raumgrenzen gearbeitet, sondern mit real aussehenden Wänden, die der Proband nicht passieren darf. Dies funktioniert allerdings nur für den ersten Testlauf (natürliches Laufen). Bei den nachfolgenden Tests wird durch die künstliche Bewegung die Position des Probanden relativ zu den Wänden verändert. Entsprechend könnte ein Proband in den Tests der künstlichen Bewegungsmethoden mit realen Wänden oder Hindernissen kollidieren, wenn er physisch durch den Raum laufen würde.

Da die Probanden in diesen Tests angewiesen werden, sich nicht durch reales Laufen durch den Raum zu bewegen, kann dieses Risiko minimiert werden, indem die Probanden vor Beginn jedes Durchlaufs in die Mitte des realen Testareals zurückkehren. Da bei den künstlichen Bewegungsmethoden lediglich Drehbewegungen in der Mitte des Raumes ausgeführt werden und die Probanden sich daher den gesamten Testdurchlauf in maximaler Entfernung von realen Hindernissen aufhalten, ist von keinem Verletzungsrisiko für die Probanden auszugehen. Wichtig ist lediglich, dass der Versuchsleiter darauf achtet, dass die Probanden sich vor jedem Testdurchlauf auch tatsächlich in der Mitte des Testareals befinden.

Für das Testareal wird eine Fläche von 3,3m x 3m verwendet (Abbildung 3-18). Dies entspricht einem diagonalen Abstand von ca. 4,5m zwischen den *lighthouse*-Stationen, was genügend Platz bieten sollte, um sich auch mit natürlichem Laufen über die Punkte zu bewegen. Gleichzeitig ist dieses Areal so klein, dass es in vielen Büroräumen für andere Nutzer umsetzbar ist und somit auch die Zugänglichkeit für andere Forschungsgruppen erhöht werden sollte. Die Maße liegen innerhalb der Herstellerspezifikationen des Systems [162].

3.7.5 Design des virtuellen Testraums und Implementation von natürlichem Laufen

Es wurde ein Raum mit weißen Wänden und ohne Dekoration erstellt, um mögliche Störfaktoren zu eliminieren. Im Anschluss wurden zunächst die notwendigen Funktionen für die Positionserfassung des Headsets sowie der Controller implementiert, um natürliches Laufen in dem Raum zu ermöglichen. Hierzu wurden die durch das *HTC Vive* generierten Positionsdaten mit dem simulierten Blickpunkt verknüpft. Auf diese Weise können Kopfbewegungen des Nutzers 1:1 in die virtuelle Darstellung übernommen werden. Beispielsweise wird bei einer Kopfrotation um 30 Grad nach rechts auch die virtuell dargestellte Perspektive um 30 Grad nach rechts rotiert. Ebenso führt eine Bewegung des Nutzers innerhalb des Testareals zu einer gleichartigen virtuellen Bewegung durch entsprechende Verlagerung der dargestellten Kameraperspektive.

Um einen einfachen virtuellen Bewegungspfad zu testen, der in allen Bewegungsmethoden wiederholt werden kann, sollten die Nutzer die immer gleichen Zielpunkte in dem virtuellen Raum ablaufen.

Auf dem Boden wurde eine weiße Platte mit einem Durchmesser von 65cm als Bewegungsziel (Abbildung 3-16) dargestellt. Zum Starten des Tests wurde der Proband aufgefordert sich auf die Platte zu begeben, woraufhin diese ihre Position verschiebt. Der Proband folgt der Platte zu ihrer neuen Zielposition, die sich erneut verschiebt. Dieser Prozess wurde wiederholt bis insgesamt 22 Positionen abgelaufen wurden.



Abbildung 3-16: Testablauf, blaues X = Position des Probanden, weißer Kreis = Zielpunkt, blauer Pfeil = Bewegungsrichtung des Probanden, weißer Pfeil = Bewegungsrichtung des Zielpunktes (eigene Darstellung)

Die 22 Zielpositionen verteilten sich auf fünf mögliche Positionen im Raum, den vier Zimmerecken und der Raummitte. Die Eckpositionen waren um je einen Meter in der X-

Achse zur Raummitte versetzt und 1,25m auf der Y-Achse (siehe Abbildung 3-18). Die Zielpunkte wurden in einer Tabelle gespeichert, wodurch diese sich mit wenig Aufwand an eine andere Testumgebung anpassen ließen (siehe Abbildung 3-17).

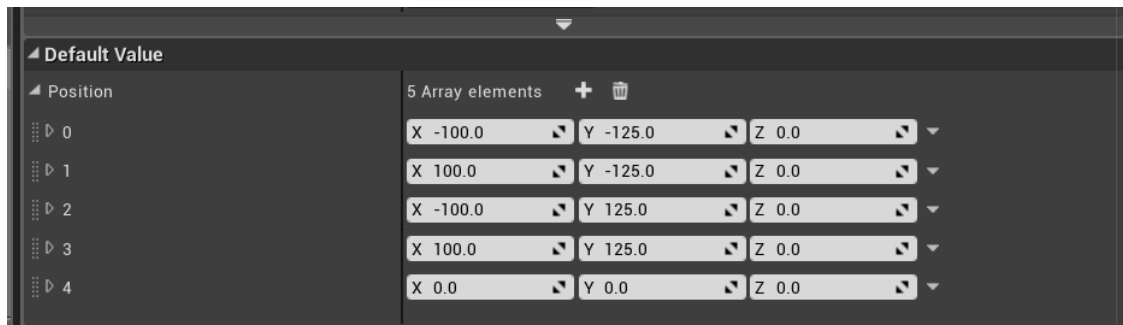


Abbildung 3-17: Zielpunkte in der Software (eigene Darstellung)

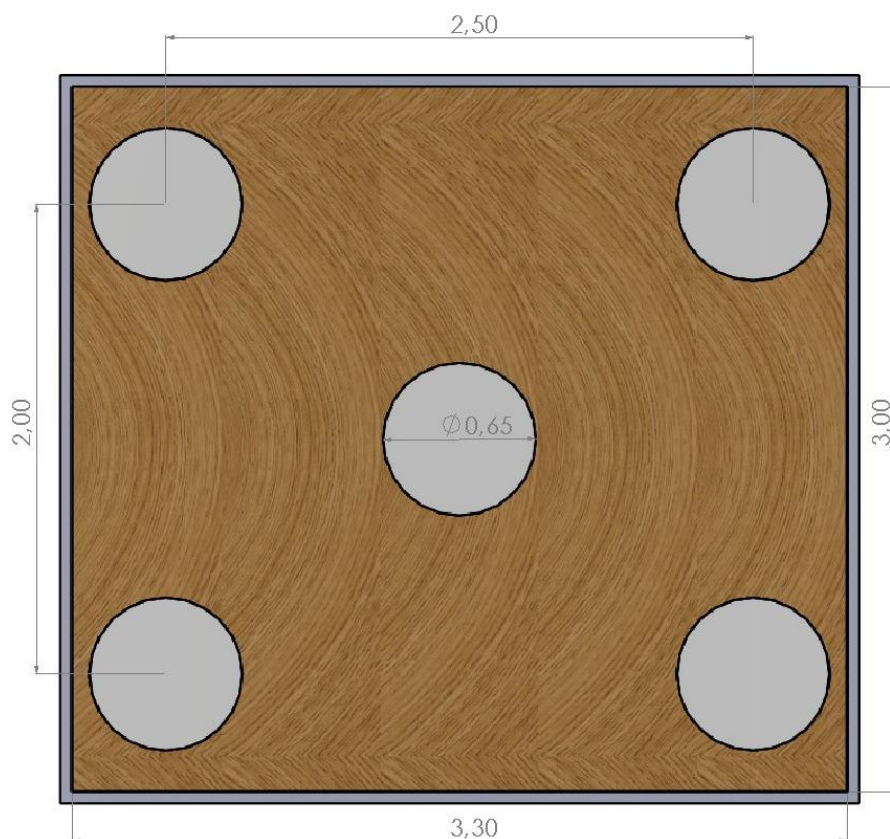


Abbildung 3-18 Positionen der Zielpunkte und Raummaße (eigene Darstellung)

Um zu erfassen, wann ein Proband einen der Zielpunkte erreicht hat, wurde die weiße Zielpunktkomponente mit einem unsichtbaren zylindrischen Volumen zur Kollisionsabfrage verknüpft (Abbildung 3-20). Die Kameraposition des Nutzers (entspricht dem

Blickpunkt des Nutzers und somit der Position des VR-Headsets) wurde ebenfalls mit einer Kollisionskomponente versehen (Abbildung 3-19).

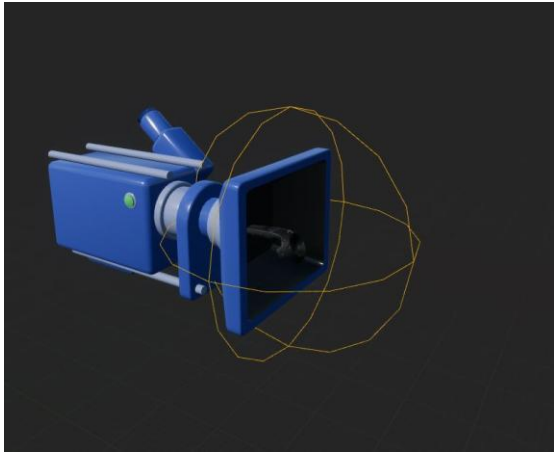


Abbildung 3-19 Die Kollisionskomponente an der Kameraposition/Headsetposition erfasst, wenn der Proband die Zielposition erreicht hat (gelbe Kugel/Gitter) (eigene Darstellung)

Befindet sich das VR-Headset über dem Zielpunkt, registriert die Software eine Überlappung dieser Kollisionskomponenten und das Weiterücken des Zielpunktes wird ausgelöst.

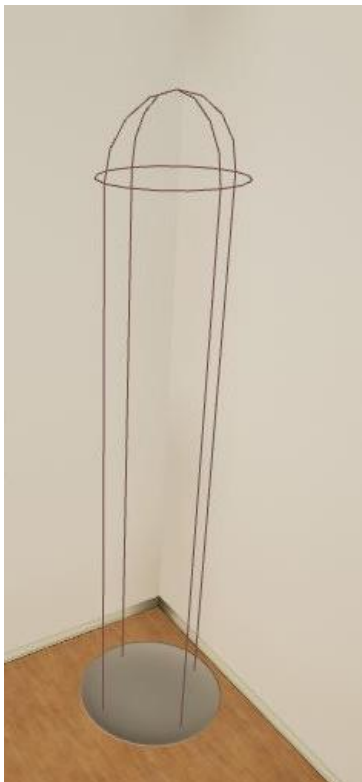


Abbildung 3-20 Kollisionskomponente an Zielposition (rotes Gitter) (eigene Darstellung)

3.7.6 Weitere Anpassung des virtuellen Testraums und Implementation der künstlichen Bewegungsmethoden

Bei ersten Tests mit diesem Aufbau berichteten Probanden von Desorientierung, da der leere Raum zu wenig Orientierungspunkte biete. Daher wurde dem Raum minimale Dekoration hinzugefügt: ein kleines Bücherregal, eine Tür, ein Bild mit dem Schriftzug und Logo der Justus-Liebig-Universität Gießen. Auch wurde der ursprüngliche weiße Boden durch eine braune Darstellung ersetzt. Der virtuelle Raum erlangte so eine gewisse Ähnlichkeit zu dem realen Testraum und bot den Probanden klare Erkennungspunkte im Raum (Abbildung 3-21).



Abbildung 3-21: Vergleich virtueller Raum und realer Raum (links nach rechts) (eigene Darstellung)

Fließbewegung aktiv wurde implementiert, indem die virtuelle Position des Nutzers flüssig vorwärts gleitet, solange dieser einen Knopf an dem Controller gedrückt hält. Die Richtung der Bewegung erfolgt zu jeder Zeit in die Richtung, in die der Controller des Nutzers gehalten wird. Die simulierte Bewegung des Nutzers erfolgt dabei lediglich auf der X- und Y-Achse im Raum. Die virtuelle Kopfhöhe des Nutzers (Z-Achse) entspricht hingegen zu jeder Zeit der Höhe des Headsets über dem realen Boden. Die simulierte Geschwindigkeit beträgt etwa 2m/s (7,2km/h). Die Geschwindigkeit wurde gewählt da So *et al.* zeigen konnten, dass Geschwindigkeiten ab 3m/s zu höheren SSQ-Scores führen [66].

Teleportation wurde implementiert, indem die virtuelle Position des Nutzers ohne Übergang auf die nächste Zielposition wechselt. Positionswechsel werden automatisch mit

Pausen von fünf Sekunden ausgelöst, um den Probanden genug Zeit zu geben, sich neu zu orientieren und den nächsten Zielpunkt zu identifizieren.

Fließbewegung passiv wurde mit einer Funktion implementiert, die den Blickpunkt des Nutzers, wie bei *Fließbewegung aktiv*, auf den Zielpunkt gleiten lässt. Der Nutzer hat nun jedoch keine Kontrolle mehr über die Bewegung, sondern er wird – wie im Falle von *Teleportation* – automatisch, mit Pausen von fünf Sekunden, über die Zielpunkte bewegt. Die Bewegung erfolgt dabei immer über den kurzstmöglichen Weg zum nächsten Zielpunkt.

Fließbewegung passiv mit Schräge ergänzte die Simulation um eine zusätzliche vertikale Bewegungskomponente über eine Schräge. Diese wurde in weiß/schwarz gekachelt dargestellt, um einen klaren Kontrast zu dem virtuellen Holzboden zu erzeugen und Desorientierung der Probanden zu verhindern (Abbildung 3-22).

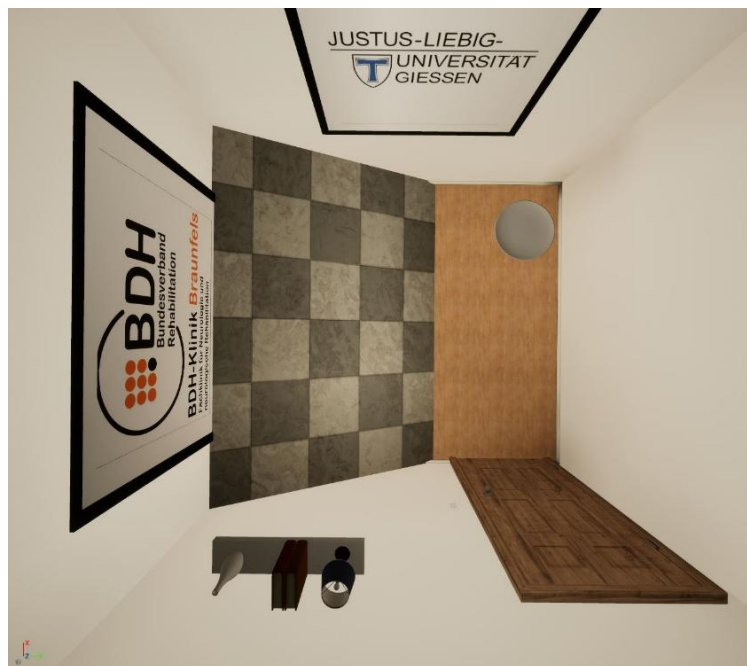


Abbildung 3-22: Testraum mit Schräge (eigene Darstellung)

Die Bewegung des Probanden erfolgte wie für *Fließbewegung passiv* beschrieben. Die Bewegung wurde ergänzt durch eine Funktion, die vor jeder neuen Bildberechnung die Höhe des VR-Headsets über dem (realen) Boden abfragt und sie in der Software in eine entsprechende Höhe über der dargestellten Schräge überträgt. Dadurch befindet sich der

Nutzer stets in einer Höhe über der dargestellten Schräge, die seinem realen Abstand zum Boden (und somit seiner Größe) entspricht, wodurch ein realistisches „Auf- und Abfahren“ möglich wird. Für alle anderen Testabläufe war eine solche Abfrage nicht notwendig, da die Bodenhöhe des virtuellen Raums in diesen – wie der reale Boden – eben war. Es war somit ausreichend, dass in der initialen Einmessung vor Versuchsbeginn einmalig die Bodenhöhe des virtuellen Raums mit der des realen Raums gleichgesetzt wurde [162].

3.8 Testablauf

Nach Ankunft der Probanden werden diesen als erstes die Testunterlagen bestehend aus Aufklärung (Anhang 4), Bogen zur Probandenerfassung (Anhang 3) sowie ein erstes Exemplar des *Simulator Sickness Questionnaire* (SSQ-Prä) (Anhang 1) ausgehändigt.

Im Anschluss werden die ausgefüllten Fragebögen auf Vollständigkeit kontrolliert und die Aufklärungsunterlagen mit dem Probanden besprochen. Es wird eine orientierende neurologische Untersuchung des Probanden durchgeführt und sichergestellt, dass keine Ausschlusskriterien für eine Teilnahme an dem Versuch vorliegen (siehe Kapitel 3.9 und Untersuchungsprotokoll – Anhang 5).

Hiernach wird dem Probanden das VR-Headset aufgezogen, die Controller übergeben und der erste Versuchsdurchlauf durchgeführt. Ein Durchlauf beschreibt dabei den Test einer Bewegungsmethode. Nach Abschluss des Durchlaufs wird der Proband nach Veränderungen der SSQ-Symptome befragt und das Ergebnis durch den Untersucher im zweiten SSQ-Fragebogen „SSQ1“ dokumentiert. Im Anschluss wird der zweite Versuchsdurchlauf durchgeführt, der Proband erneut befragt und das Ergebnis im Fragebogen „SSQ2“ dokumentiert. Das gleiche Vorgehen wird für die Durchläufe drei bis fünf mit den entsprechenden SSQ-Fragebögen wiederholt (Abbildung 2-2).

Testablauf

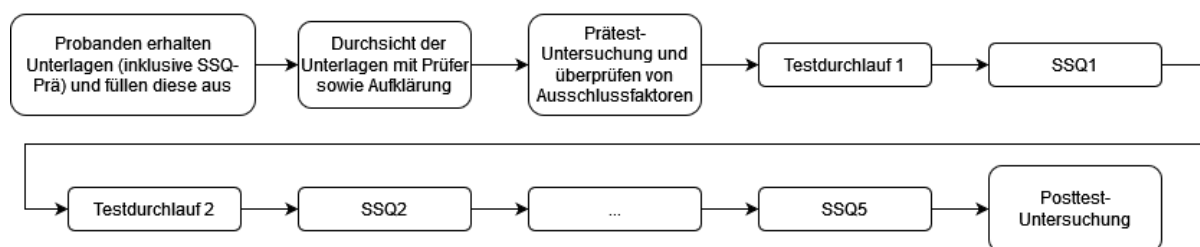


Abbildung 3-23: Testablauf (eigene Darstellung)

Der erste Testdurchlauf wird mit Bewegung durch natürliches Laufen durchgeführt. Sofern die Software durch die dargestellte Umgebung keine Symptome einer SK auslöst, wäre davon auszugehen, dass sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen des Prätest-SSQ mit denen des SSQ1 zeigt. Umgekehrt sollte sich bei den künstlichen Bewegungsmethoden, oder zumindest einem Teil davon, eine Erhöhung der SSQ-Werte

zeigen, sofern die Software erfolgreich darin ist, Symptome bewegungsmethodenabhängig auszulösen.

Nach dem erwähnten Durchlauf mit natürlicher Bewegung wird die Reihenfolge der nachfolgenden Tests so gewählt, dass eine abnehmende Verträglichkeit angenommen wird. Nutzerkontrollierte Bewegungen gelten in der Regel als weniger symptomauslösend, so gilt es beispielsweise als weniger wahrscheinlich, dass der Fahrer eines Fahrzeugs an Reisekrankheit leidet als ein Beifahrer. Aus diesem Grund wird *Fließbewegung aktiv* (als einzig aktiv kontrollierte Bewegungsmethode) als erste künstliche Bewegungsmethode getestet [53], [54], [131], [189]. In anderen Arbeiten wurde *Teleportation* als verträglicher als *Fließbewegung* beschrieben, weshalb es als erste der passiven Bewegungsmethoden getestet werden sollte, gefolgt von *Fließbewegung passiv* und schließlich *Fließbewegung passiv mit Schräge* [41], [106], [109]. Bei der Bewegungsmethode *Teleportation* wurde auf eine Unterteilung in aktiv und passiv verzichtet, da in diesem Fall keine wirkliche Bewegung simuliert wird und es daher unwahrscheinlicher erschien, dass hierbei ein Unterschied bestehen würde. Da wie unter 3.7.3 beschrieben die Versuchszeit möglichst nicht 15 Minuten überschreiten sollte, hätten weitere Bewegungsmethoden zudem eine Verkürzung der einzelnen Testdurchläufe bedeutet.

3.9 Fallzahlplanung und Probandenakquise

Um die Probandenzahl abzuschätzen, die für aussagekräftige Ergebnisse notwendig ist, wurden ähnliche Studien betrachtet: Frommel und Sonntag untersuchten 2017 an 20 Probanden Unterschiede zwischen verschiedenen VR-Bewegungsmethoden, unter denen auch Varianten von *Fließbewegung* und *Teleportation* vorkamen. In dieser Studie konnten signifikante Unterschiede zwischen den Bewegungsmethoden gezeigt werden, wobei *Teleportation* besser vertragen wurde als Formen von *Fließbewegung*. Ähnliche Ergebnisse berichteten auch Christou und Aristidou in einer Studie mit 18 Probanden aus dem Jahr 2017 und Habgood *et al.* 2018 bei einer Studie mit 36 Probanden. Die genannten Arbeiten setzten eigens entwickelte Software ein, die sich aber an Computerspielen orientierte und relativ große Areale simulierten. Dementsprechend war in diesen Arbeiten

kein Vergleich der künstlichen Bewegungsmethoden mit natürlichem Laufen möglich [41], [108], [197].

Für die vorliegende Studie wurde auf Basis der vorhandenen Literatur eine Mindestprobandenanzahl von 36 angenommen. Da jedoch bei der Betrachtung der nutzerspezifischen Einflussfaktoren (siehe auch 0) Subgruppen der Probanden betrachtet werden sollen, wurde versucht, diese Zahl zu übertreffen, um die Wahrscheinlichkeit zu erhöhen, für möglichst viele Subgruppen aussagekräftige Daten zu gewinnen.

Die Rekrutierung der Probanden gliederte sich in drei Gruppen:

1. Mitarbeiter der BDH-Klinik Braunfels, welche über einen Aushang in der Klinik auf die Studie aufmerksam wurden.
2. Studenten der Technischen Hochschule Mittelhessen. Diese wurden in Vorlesungen auf die Studie aufmerksam gemacht und um Mitarbeit gebeten.
3. Mitarbeiter am Institut für Medizinische Informatik der Justus-Liebig-Universität Gießen, die durch Aushänge auf die Studie aufmerksam wurden.

Probanden wurden für ihre Teilnahme an der Studie nicht entschädigt, es wurde jedoch die Möglichkeit geboten bei Interesse im Anschluss an die Versuchsdurchführung Spiele und andere Applikationen auf dem VR-Headset zu testen.

Teilnehmerinnen mit einer bestehenden Schwangerschaft wurden von der Studie ausgeschlossen, da davon ausgegangen wird, dass während einer Schwangerschaft die Anfälligkeit für Kinetosen erhöht ist. Auch können während einer Schwangerschaft Symptome wie Übelkeit und Kopfschmerzen auftreten, die sich mit denen einer SK überschneiden [52], [143], [198]. Ebenfalls aufgrund von sich eventuell überschneidenden Symptomen wurden Teilnehmer mit neurologischen Vorerkrankungen von der Studie ausgeschlossen, sowie Teilnehmer mit Herzrhythmusstörungen [131], [199].

Insgesamt erschienen 115 Probanden zur Teilnahme an der Studie. Vier Teilnehmer wurden ausgeschlossen, da sie mindestens eines der Ausschlusskriterien erfüllten, folglich wurden 111 Probanden in die Studie eingeschlossen.

3.10 Statistische Analyse

Die Testergebnisse wurden für jeden der 111 Probanden zu sechs unterschiedlichen Zeitpunkten erfasst, einmal vor Versuchsdurchführung als Ausgangswert und nach jedem der fünf Testdurchläufe. Insgesamt liegen folglich 111 Beobachtungen zu jeweils sechs Testbedingungen (inkl. Ausgangswert) vor.

Die Skalen wurden entsprechend der Vorgaben in Bimberg *et al.* (2020) gebildet [63]. Alle Skalen verwendeten metrische Variablen und wurden initial anhand ihres Histogramms und QQ-Plots, sowie des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung geprüft.

Aufgrund der stark rechtsschiefen Verteilungen werden Mediane zusätzlich zu Mittelwerten und Standardabweichungen berichtet.

Für die Analyse der Skalen wurden aufgrund der schiefen Verteilung robuste und nicht-parametrische Analysemethoden gewählt: Für die Vergleiche über alle Testbedingungen wurde eine heteroskadistische ANOVA für getrimmte Mittelwerte berechnet [200] und als Effektstärkemaß Kendalls *W* berichtet [201], [202]. Im Falle eines signifikanten Haupteffekts wurden zusätzlich Posthoc-Tests durchgeführt, um die einzelnen Testbedingungen miteinander zu vergleichen. Diese basierten auf linearen Kontrasten und wurden für multiples Testen mittels Hochbergs Step-Up Prozedur korrigiert [203].

Als Effektstärkemaß auf posthoc-Ebene wurde dabei die biseriale Korrelation zwischen den Scores der Testbedingungs-paare gewählt, wobei 0.1 einem kleinen, 0.3 einem moderaten und 0.5 einem großen statistischen Effekt entspricht.

Um den Einfluss von Kovariaten (Geschlecht, Sport etc.) zu bestimmen, wurden im nächsten Schritt ANOVAs mit Aligned Rank Transformation berechnet [204], auch hier wurden im Falle signifikanter Interaktionsterme Wilcoxon-Tests im Rahmen der post-hoc-Tests eingesetzt, in diesem Fall allerdings für unabhängige Stichproben. Auch in diesem Fall wurde wieder die biseriale Korrelation als Maß der Effektstärke auf Ebene der post-hoc Vergleiche berichtet.

Die Datenanalyse erfolgte in der Software R [205].

4 Ergebnisse

4.1 Probandenkollektiv

4.1.1 Probandenkollektiv – Alter und Geschlecht

Von 115 Probanden, die zur Teilnahme an die Studie erschienen, wurden 4 von der Studie ausgeschlossen. In die Studie wurden folglich n=111 Probanden (100%) eingeschlossen, von denen 46 weiblich (41,6%) und 65 männlich (58,6%) waren.

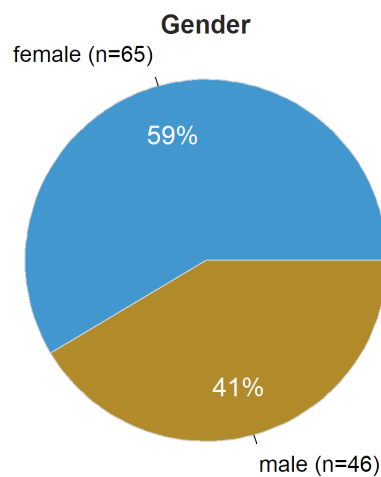


Abbildung 4-1: Geschlechterverteilung der Probanden (eigene Darstellung)

Zum Zeitpunkt der Durchführung des Versuchs betrug das Alter der 111 in die Untersuchung eingeschlossenen Probanden im Median 26 Jahre, unter der 25ten Perzentile 22 Jahre und unter der 75ten Perzentile 30 Jahre. Das Alter des jüngsten Probanden betrug 18, und das des ältesten 66 Jahre.

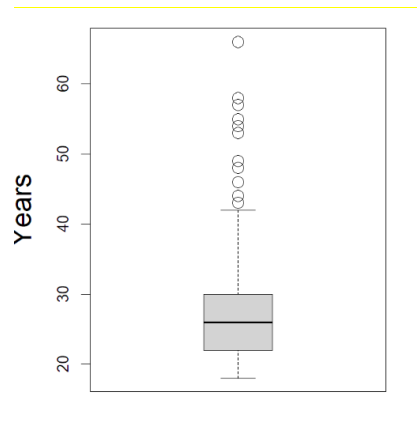


Abbildung 4-2: Altersverteilung der Probanden (eigene Darstellung)

4.1.2 Probandenkollektiv - Fehlsichtigkeit

Unter den 111 Probanden lag, laut Selbstausskunft der Probanden, bei 56 Probanden (50,5%) keine Fehlsichtigkeit, bei 41 Probanden (36,9%) eine Kurz-, bei 12 Probanden (10,8%) eine Weit- und bei 2 (1,8%) eine kombinierte Kurz- sowie Weitsichtigkeit vor. Insgesamt bestand somit bei 55 (49,5%) der Probanden eine Fehlsichtigkeit

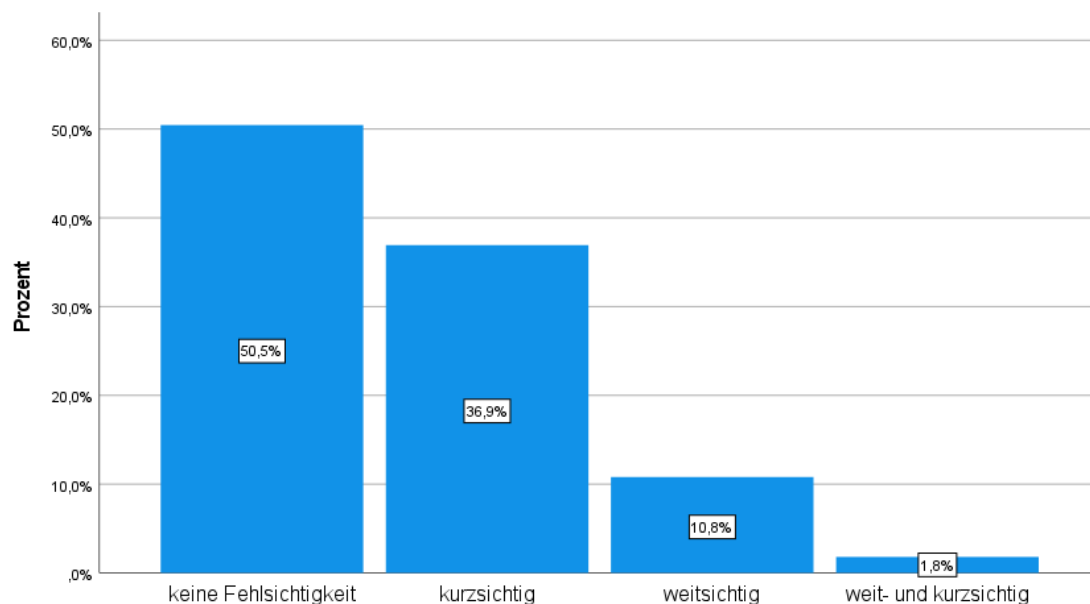


Abbildung 4-3: Verteilung Fehlsichtigkeitsgruppen (eigene Darstellung)

4.1.3 Probandenkollektiv – Vorerfahrung VR

Von den 111 Probanden gaben 63 (56,8%) an, über keine Vorerfahrung mit VR-Systemen zu verfügen. 25 Probanden (22,5%) gaben an, ein VR-System mit Bewegungserfassung (*Motion Tracking*) maximal 2-mal getestet zu haben und 3 (2,7%) gaben an, ein solches System bereits öfter verwendet zu haben. 18 Probanden (16,2%) gaben an ein VR-System ohne *Motion Tracking* maximal 2-mal getestet zu haben und 2 (1,8%) gaben an, ein solches System bereits öfter verwendet zu haben. Zusammengefasst gaben somit 28 (25,2%) Probanden an, über Vorerfahrungen mit VR-System mit Motion-Tracking und 20 (18%) über Vorerfahrungen mit VR-Systemen ohne Motion-Tracking zu verfügen.

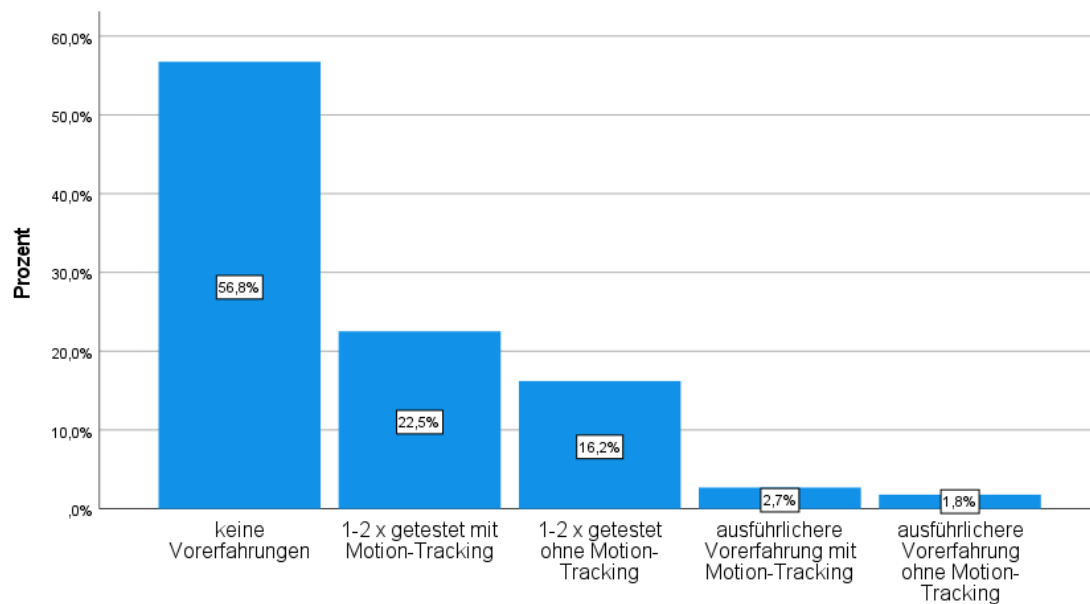


Abbildung 4-4: Gruppenverteilung Vorerfahrung mit VR-Systemen (eigene Darstellung)

4.1.4 Probandenkollektiv – Anfälligkeit für Reisekrankheit

Da nicht alle Probanden über Erfahrung in allen abgefragten Szenarien verfügten, wurde aus den Punktzahlen, die die Probanden für die einzelnen Reisekrankheitsszenarien vergeben hatten, der Mittelwert gebildet und im Weiteren betrachtet. Im Median bewerteten die Probanden ihre Anfälligkeit für Reisekrankheit (RK) mit einer Punktzahl von 2 [1,333;2,433] von 5. Das Minium betrug 1 und das Maximum 5. Die 25te Perzentile be-

trug 1,333 und die 75te Perzentile 2,433. Basierend auf diesen Angaben wurden die Probanden in die Kategorien „geringe Anfälligkeit RK“ ($<1,5$), „mittlere Anfälligkeit RK“ und „hohe Anfälligkeit RK“ eingeteilt. Die Einteilung der Kategorien erfolgte zu möglichst gleichen Teilen.

Die Gruppe „niedrige Anfälligkeit RK“ beinhaltete 28 Probanden (25,23%) die über die geschilderten Szenarien eine durchschnittliche Punktzahl von unter 1,5 vergeben hatten.

Die Gruppe „mittlere Anfälligkeit RK“ beinhaltete 45 Probanden (40,54%) die über die geschilderten Szenarien eine durchschnittliche Punktzahl von 1,5 bis 2,43 vergeben hatten.

Die Gruppe „hohe Anfälligkeit RK“ beinhaltete 38 Probanden (34,23%) die über die geschilderten Szenarien eine durchschnittliche Punktzahl von über 2,43 vergeben hatten.

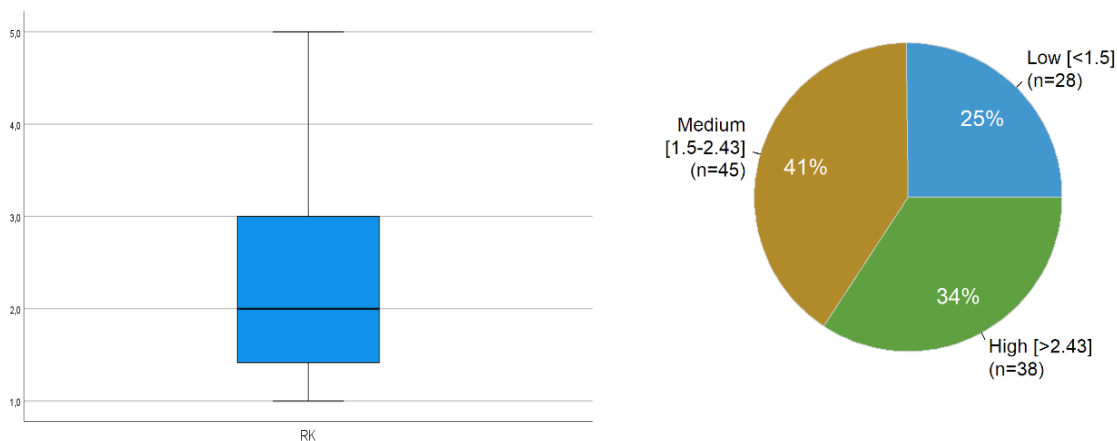


Abbildung 4-5: Selbsteinschätzung Reisekrankheit, Verteilung (links) und Gruppeneinteilung (rechts) (eigene Darstellung)

4.1.5 Probandenkollektiv – Stunden Sport pro Woche

Im Median gaben die Probanden an, 2,5 [0; 4,5] Stunden Sport pro Woche zu betreiben.

Die Probanden wurden basierend auf den angegebenen Stunden Sport pro Woche in die Gruppen „niedrige sportliche Aktivität“, „moderate sportliche Aktivität“ und „hohe sportliche Aktivität“ eingeteilt. Die Einteilung erfolgte zu möglichst gleichen Teilen.

Die Gruppe „niedrige sportliche Aktivität“ beinhaltete 35 Probanden (31,53%), die angegeben hatten, unter 2 Stunden Sport pro Woche zu betreiben.

Die Gruppe „moderate sportliche Aktivität“ beinhaltete 36 Probanden (32,43%), die angegeben hatten mindestens 2 und höchstens 3,5 Stunden Sport pro Woche zu betreiben.

Die Gruppe „hohe sportliche Aktivität“ beinhaltete 40 Probanden (36,04%) die angegeben hatten mehr als 3,5 Stunden Sport pro Woche zu betreiben (siehe Abbildung 13).

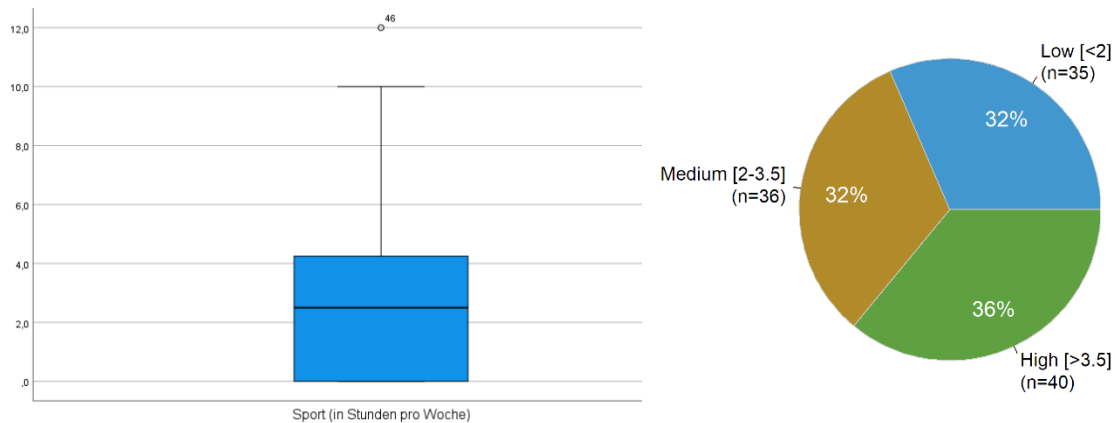


Abbildung 4-6: Sport pro Woche, Verteilung (links) und Gruppeneinteilung (rechts) (eigene Darstellung)

4.1.6 Probandenkollektiv – Videospielkonsum

Im Median gaben die Probanden an, 0 [0;2,5] Stunden pro Woche mit Videospielen zu verbringen. Der niedrigste angegebene Wert betrug 0 Stunden und der höchste 20 Stunden Videospiele pro Woche. Da der Median bei null Stunden Videospielkonsum lag, wurden die Probanden in nur 2 Gruppen eingeteilt. In „0 Stunden Videospiele pro Woche“, mit 80 Probanden (72,1%) und in „>0 Stunden Videospiele pro Woche mit 31 Probanden (27,9%).“

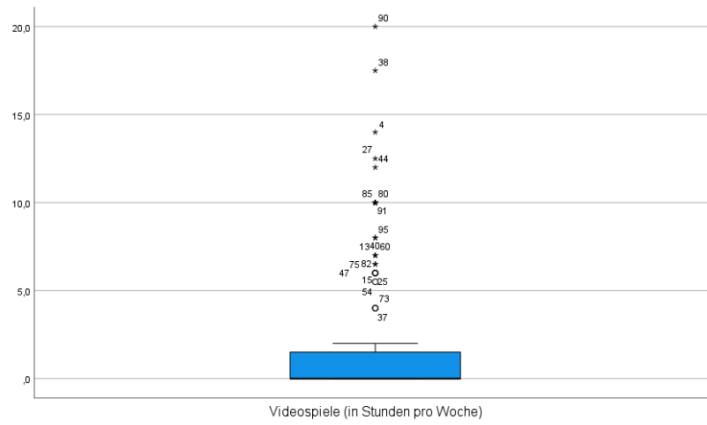


Abbildung 4-7: Verteilung der Stunden an Videospiele pro Woche pro Probanden (eigene Darstellung)

4.2 SSQ-Resultate und Einfluss der Software

In Tabelle 4-1 und Abbildung 4-8 sind die Ergebnisse der SSQ-Scores sowohl für den Prätest (Pre), als auch für die einzelnen Testdurchläufe dargestellt. Zur besseren Lesbarkeit sind die Testdurchläufe nummeriert:

T1 = natürliches Laufen,

T2 = *Fließbewegung aktiv*,

T3 = *Teleportation*,

T4 = *Fließbewegung passiv*,

T5 = *Fließbewegung passiv mit Schräge*.

	Nausea			Oculomotor			Disorientation			Total		
	Md	MW	SD	Md	MW	SD	Md	MW	SD	Md	MW	SD
Pre	0.0 0	4.64	8.71	7.5 8	9.08	9.85	0.00	4.14	10.3 8	3.74	6.03	7.22
T1	0.0 0	5.16	9.43	7.5 8	9.56	11.0 9	0.00	5.02	10.9 1	3.74	6.50	7.92
T2	9.5 4	10.4 9	14.0 3	7.5 8	10.9 9	11.2 8	13.9 2	20.1 9	18.2 7	11.2 2	12.4 0	10.4 0
T3	0.0 0	5.24	9.86	7.5 8	9.22	10.1 9	0.00	6.52	13.3 8	3.74	6.81	8.09
T4	9.5 4	10.8 3	16.1 9	7.5 8	11.3 4	12.1 7	13.9 2	22.5 7	22.1 3	11.2 2	13.2 8	12.0 4
T5	9.5 4	14.2 7	20.4 2	7.5 8	12.4 3	13.9 3	27.8 4	27.5 9	27.5 2	14.9 6	15.8 0	14.6 7

Tabelle 4-1: Mittelwerte, Mediane und Standardabweichungen der Absolutwerte für Totalscore sowie für die einzelnen Skalen während der unterschiedlichen Testbedingungen

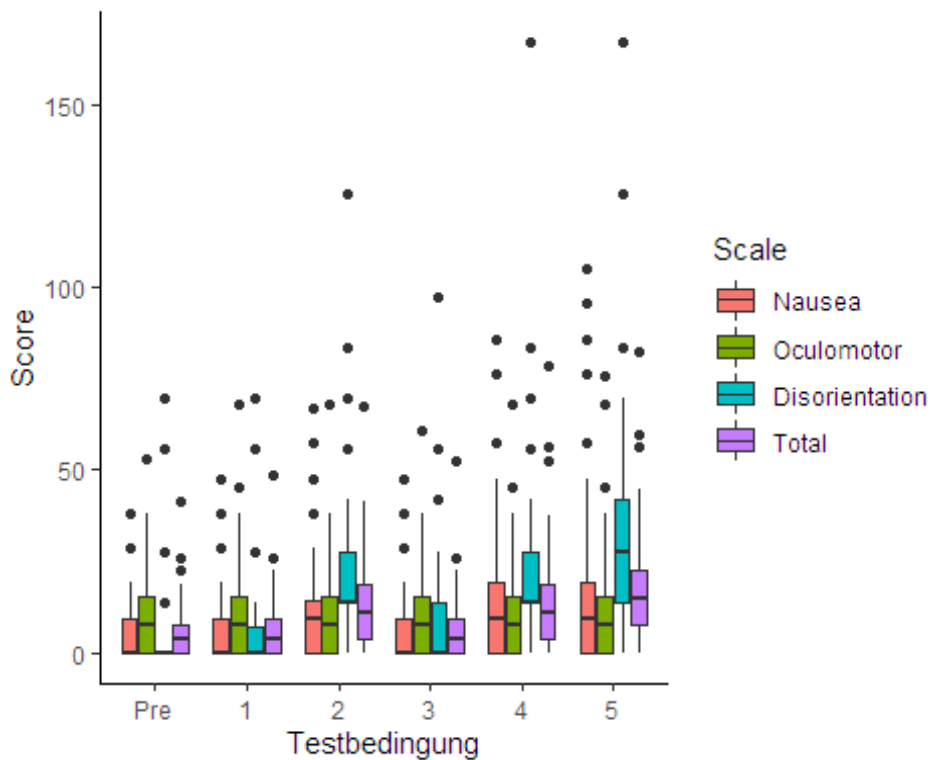


Abbildung 4-8: Absolutwerte der unterschiedlichen Skalen in Abhängigkeit der Testbedingungen (eigene Darstellung)

Es zeigt sich, dass die Symptomlast im Prätest nicht Null betrug, und somit auch ohne experimentelle Manipulation Symptome vorlagen. *Totalscores* zwischen 10 und 15 gelten als deutliche Symptome und es zeigt sich, dass Mittelwerte sowie Mediane für T2 (*Fließbewegung aktiv*), T4 (*Fließbewegung passiv*) und T5 (*Fließbewegung passiv mit Schräge*) in diesem Bereich liegen [63].

Um zu beurteilen, ob die Software durch ihre dargestellte Umgebung bereits Symptome auslöst, ist der Unterschied zwischen Prätest und T1 (natürliches Laufen) von besonderem Interesse. Da in Test 1 noch keine künstliche Bewegungsmethode verwendet wurde, sondern die Probanden lediglich auf natürliche Weise durch den Raum liefen, würde eine erhöhte Punktzahl gegenüber dem Prätest nahelegen, dass etwaige Symptome entweder auf das VR-System selbst zurückzuführen sind oder durch die dargestellte Umgebung der Software ausgelöst wurden. Daher wurden Äquivalenztests zwischen Prätest und T1 durchgeführt, die bestätigten, dass die berichteten Symptome zwischen den beiden Zeitpunkten nicht signifikant variierten. Die Probanden berichteten folglich keine signifikant

höheren SSQ-Werte nach dem Testdurchlauf mit natürlichem Laufen als vor der Versuchsdurchführung (Tabelle 4-2).

Scale	t	p-value	r_rankbise- rial	Lower CI	Upper CI
Nausea	-9.29	<.001	.088	-.092	.262
Oculomotor	-10.926	<.001	.087	-.092	.261
Disorienta- tion	-7.418	<.001	.105	-.075	.278
Total	-10.577	<.001	.170	-.008	.338

Tabelle 4-2: Äquivalenztests für Prätest vs. T1 (eigene Darstellung)

Da die Punktwerte im Prätest jedoch nicht durchgehend Null betrugen, werden – wie von anderen Autoren empfohlen – Differenzen zum Prätest gebildet und in der weiteren Analyse verwendet (siehe Tabelle 4-3 und Abbildung 4-9) [63], [206].

4.3 SSQ-Differenz gegenüber Prätest und Einfluss der Subskalen

	Nausea			Oculomotor			Disorientation			Total		
	Md	MW	SD	Md	MW	SD	Md	MW	SD	Md	MW	SD
T1	0.00	0.52	2.52	0.00	0.48	2.56	0.00	0.88	3.88	0.00	0.47	1.76
T2	0.00	5.84	10.14	0.00	1.91	4.95	13.92	16.05	14.44	3.74	6.37	6.21
T3	0.00	0.60	2.96	0.00	0.14	1.44	0.00	2.38	6.73	0.00	0.77	2.26
T4	0.00	6.19	11.62	0.00	2.25	5.27	13.92	18.43	18.21	3.74	7.24	8.20
T5	0.00	9.63	17.33	0.00	3.35	7.70	13.92	23.45	24.40	7.48	9.77	11.57

Tabelle 4-3: Änderung gegenüber Prätest in Abhängigkeit der Testbedingungen

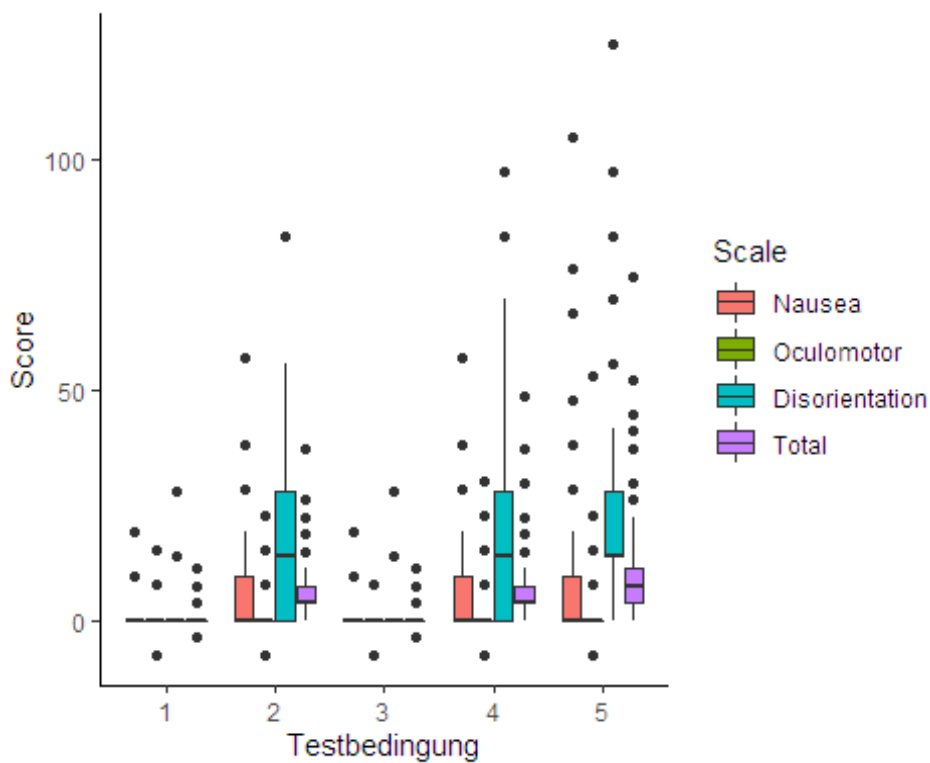


Abbildung 4-9: Änderung gegenüber Prätest in Abhängigkeit der Testbedingungen (eigene Darstellung)

Schnell erkennbar ist, dass neben T1 (natürliches Laufen) auch T3 (*Teleportation*) keine bis äußerst geringe Änderungen gegenüber dem Prätest zeigt, mit Mittelwerten von null auf allen Skalen. In den Tests T2 (*Fließbewegung aktiv*), T4 (*Fließbewegung passiv*) und

T5 (*Fließbewegung passiv mit Schräge*) hingegen zeigt sich eine deutliche Zunahme der berichteten Symptome.

Weiterhin ist in Abbildung 4-9 zu erkennen, dass es Daten mit weniger als null Punkten gab. Dies ist auf eine einzelne Versuchsperson zurückzuführen, die im Prätest eine Punktzahl von 1 (geringe Symptome) für das Item 2 (Müdigkeit) angab, dies im weiteren Testverlauf jedoch auf 0 (keine Symptome) zurückstufte. Die Symptomreduktion ist dabei über alle Bewegungsmethoden konstant und verfälscht den Vergleich der Bewegungsmethoden untereinander entsprechend nicht. Weiterhin ist zu erkennen, dass die höchsten Punktwerte auf der Skala *Disorientation* erreicht wurden. Hierbei sei allerdings angemerkt, dass die Berechnung der Scores für die einzelnen Skalen nicht einheitlich ist und die Werte zwischen den Skalen entsprechend nur bedingt vergleichbar sind [63], [71].

	F	df1	df2	p	Kendall W
Nausea	6.526	1.898	125.252	0.002	0.091
Oculomotor	0.759	1.321	87.214	0.421	0.030
Disorientation	48.255	2.425	160.050	< 0.001	0.387
Total	62.561	2.436	160.743	< 0.001	0.470

Tabelle 4-4: heteroskadistische ANOVA für getrimmte Mittelwerte für Totalscore sowie die verschiedenen Subskalen

Um zu analysieren, inwiefern sich die vorhandenen Änderungen auf den verschiedenen Skalen des SSQ zeigen, wurde eine ANOVA durchgeführt. Hier zeigte sich, dass für den *Totalscore*, sowie für alle Subskalen außer *Oculomotor* ein signifikanter Haupteffekt vorlag, entsprechend, dass die Bewegungsmethoden auf diesen Skalen eine signifikante Änderung der berichteten Symptome bewirkten ($p \leq 0.002$, siehe Tabelle 5.3 und Abbildung 5-13).

Weiterhin zeigte sich, dass *Disorientation* die höchste Effektstärke (Kendall W = 0.387) der Subskalen aufwies und sich auch im *Totalscore* ein deutlicher Effekt

(Kendall $W = 0.47$) zeigte. Die verschiedenen Bewegungsmethoden zeigten also einen deutlichen Einfluss auf den *Totalscore* und unter den Subskalen vor allem auf der Skala *Disorientation*. Der Einfluss auf die Skala *Nausea* war ebenfalls statistisch signifikant, jedoch weniger stark in seinem Effekt.

Dies deckt sich mit den in der Literatur berichteten Beobachtungen, dass sich die höchsten Werte der Subskalen in VR-Anwendungen auf der Disorientationskala zeigen [42], [65].

4.4 Vergleich der Bewegungsmethoden untereinander

Zur Betrachtung der Unterschiede der Bewegungsmethoden relativ zueinander wurden Posthoc-Tests zwischen den einzelnen Durchläufen durchgeführt. Hier zeigte sich im Totalscore kein statistisch relevanter Unterschied zwischen Bewegungsmethode T2 (*Fließbewegung aktiv*) und T4 (*Fließbewegung passiv*) und zwischen T1 (natürliches Laufen) und T3 (*Teleportation*). Diese Paare an Bewegungsmethoden waren folglich, unter den gegebenen Testbedingungen, in ihrer Verträglichkeit vergleichbar.

Zwischen allen anderen Testdurchläufen bestanden signifikante Unterschiede mit p-Werten von <0.001 .

Die Bewegungsmethode T2 (*Fließbewegung aktiv*) geht dabei mit einem höheren Totalscore sowohl im Vergleich mit T1 (natürliches Laufen) als auch verglichen mit T3 (*Teleportation*) einher. T5 (*Fließbewegung passiv mit Schräge*) zeigt nochmals signifikant höhere Punktzahlen.

Insgesamt zeigt sich *Teleportation* als die künstliche Bewegungsmethode mit den niedrigsten berichteten SSQ-Werten und als vergleichbar mit natürlichem Laufen. Die auf Fließbewegung basierenden Bewegungsmethoden zeigen eine signifikant niedrigere Verträglichkeit.

Group	Group	psihat	ci.lower	ci.upper	p.value	p.crit	sig.	r_rankbise- rial
T 1	T 2	-	-6.151	-3.562	<	0.006	*	-0.747
T 1	T 3	0.000	0.000	0.000	NaN	0.005		-0.047
T 1	T 4	-	-6.826	-3.110	<	0.010	*	-0.708
T 1	T 5	-	-8.844	-4.553	<	0.009	*	-0.779
T 2	T 3	4.466	3.181	5.750	<	0.006	*	0.698
T 2	T 4	-0.279	-1.696	1.138	0.569	0.050		-0.027
T 2	T 5	-	-3.600	-0.643	<	0.025	*	-0.155
T 3	T 4	-	-6.711	-3.002	<	0.013	*	-0.667
T 3	T 5	-	-8.609	-4.454	<	0.007	*	-0.741
T 4	T 5	-	-2.536	-0.813	<	0.017	*	-0.125

Tabelle 4-5: Posthoc-Vergleich Bewegungsmethoden untereinander

4.5 Einfluss der Bewegungsmethoden auf Ebene der Einzelitems

Um zu untersuchen, ob die getesteten Bewegungsmethoden einen besonders starken Effekt auf bestimmte Symptome zeigen, wurde ein Friedmann Test über alle einzelnen Symptome (Items) des Fragebogens durchgeführt (Tabelle 4-6). Dort zeigen sich statistisch signifikante Änderungen ($p < 0,05$) lediglich für 8 der 16 abgefragten Items. Nur bei diesen wurde von den Probanden folglich eine statistisch signifikante Änderung der Symptomstärke durch die Bewegungsmethoden berichtet. Diese waren 1 (Allgemeines Unwohlsein), 3 (Kopfschmerzen), 7 (Schwitzen), 8 (Übelkeit), 12 (Schwindelsymptome bei geöffneten Augen), 13 (Schwindelsymptome bei geschlossenen Augen), 14 (Drehschwindel), 15 (Wahrnehmung des Magens). Auffällig ist, dass Item 12 (Schwindel bei geöffneten Augen) eine sehr viel höhere Effektstärke aufweist als die restlichen Symptome. Die verschiedenen Bewegungsmethoden scheinen also mit der stärksten Änderung der Symptomlast bei diesem Item einherzugehen

Item	chi ²	Df	p	Kendalls W	SSQ-Skala
1	58.494	4.000	<0.001	0.026	Nausea + Oculomotor
2	4.000	4.000	0.406	0.000	Oculomotor
3	13.524	4.000	0.009	0.001	Oculomotor
4	2.400	4.000	0.663	0.000	Oculomotor
5	1.000	4.000	0.910	0.000	Oculomotor + Disorientation
6	5.000	4.000	0.287	0.000	Nausea
7	33.369	4.000	<0.001	0.010	Nausea
8	20.356	4.000	<0.001	0.004	Nausea + Disorientation
9	7.429	4.000	0.115	0.000	Nausea + Oculomotor
10	2.400	4.000	0.663	0.000	Disorientation
11	4.000	4.000	0.406	0.000	Oculomotor + Disorientation
12	236.764	4.000	<0.001	0.360	Disorientation
13	51.885	4.000	<0.001	0.022	Disorientation
14	12.721	4.000	0.013	0.001	Disorientation
15	55.531	4.000	<0.001	0.024	Nausea
16	3.000	4.000	0.558	0.000	Nausea

Tabelle 4-6: Friedmantest der einzelnen Items sowie Zuordnung zu den Skalen in denen die Items berücksichtigt werden

4.6 Analyse möglicherer weiterer Einflussfaktoren

Zur Analyse möglicherer weiterer Einflussfaktoren auf den Totalscore wurden robuste ANOVAs durchgeführt. Es wurde dabei sowohl eine Analyse über alle Tests hinweg durchgeführt, als auch unter Berücksichtigung der einzelnen Untertests.

Bei der Analyse über alle Tests (Tabelle 4-7) zeigte sich ein signifikanter Einfluss des Geschlechts, der Vorerfahrung mit VR-Systemen, der Selbsteinschätzung für die Anfälligkeit für Reisekrankheit sowie für die sportliche Aktivität. Für Fehlsichtigkeit ($p=0,587$), Videospielkonsum ($p=0,291$) und Alter ($p=0,795$) zeigte sich kein statistisch relevanter Effekt.

	dfNum	dfDen	F	p	η_p^2
Geschlecht	1.000	109.000	10.804	0.001	0.090
Fehlsichtigkeit	3.000	107.000	0.647	0.587	0.006
Vorerfahrung mit VR-Systemen	4.000	106.000	2.737	0.033	0.025
Selbsteinschätzung Reisekrankheit	2.000	108.000	11.763	0.001	0.098
Sport	2.000	108.000	3.240	0.043	0.029
Videospielkonsum	1.000	109.000	1.124	0.291	0.010
Altersgruppen ($\geq 50, < 50$)	1.000	109.000	0.068	0.795	0.001

Tabelle 4-7: ART ANOVA des Totalscore mit möglichen Einflussfaktoren

Unter Berücksichtigung der einzelnen Untertests (Tabelle 3-19) zeigten sich signifikante Effekte für das Geschlecht, die Vorerfahrung mit VR-Systemen, die Selbsteinschätzung sowie für Sport. Fehlsichtigkeit zeigte in dieser Betrachtung ebenfalls einen signifikanten Effekt ebenso wie das Alter der Probanden.

	dfNum	dfDen	F	p	η_p^2
Geschlecht X Untertest	4.000	436.000	12.382	<0.001	0.028
Fehlsichtigkeit X Untertest	12.000	428.000	1.815	0.044	0.004
Vorerfahrung mit VR-Systemen X Untertest	16.000	424.000	2.394	0.002	0.006
Selbsteinschätzung Reisekrankheit X Untertest	8.000	432.000	8.057	<0.001	0.018
Sport X Untertest	8.000	432.000	3.301	0.001	0.008
Videospielkonsum X Untertest	4.000	436.000	0.679	0.607	0.002
Altersgruppen X Time	4.000	436.000	4.578	<0.001	0.010

Tabelle 4-8: ART ANOVA des Totalscore mit möglichen Einflussfaktoren über Untertests

Im folgenden Kapitel sollen nun die einzelnen Effekte genauer betrachtet werden.

4.6.1 Analyse der Einflussfaktoren – Geschlecht

Bei der Analyse zum Einfluss des Geschlechts innerhalb der Untertests zeigen sich signifikante Unterschiede im Totalscore für T1 (natürliches Laufen) ($p=0.025$) und T5 (*Fließbewegung passiv mit Schräge*) ($p=0.014$). T1 ging mit höheren Scores für die männlichen Probanden einher, T5 hingegen mit höheren Scores der weiblichen Probanden (Tabelle 4-10).

Bei der Analyse der Untertests innerhalb der Geschlechtergruppen zeigte sich für weibliche Probanden – im Gegensatz zu den Ergebnissen des Gesamtkollektivs – signifikant ($p=0.025$) höhere Punktzahlen für T3 (*Teleportation*) verglichen mit T1 (natürliches Laufen). Verglichen mit den anderen getesteten künstlichen Bewegungsmethoden zeigte *Teleportation* jedoch auch für weibliche Probanden die niedrigsten SSQ-Werte. Bei den männlichen Probanden zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen auf *Fließbewegung* basierenden Bewegungsmethoden T2, T4 und T5. Die weiblichen Probanden berichteten hingegen signifikant höhere Punktzahlen für T5 verglichen mit T2 ($p=0.031$) (Anhang 12.6.2).

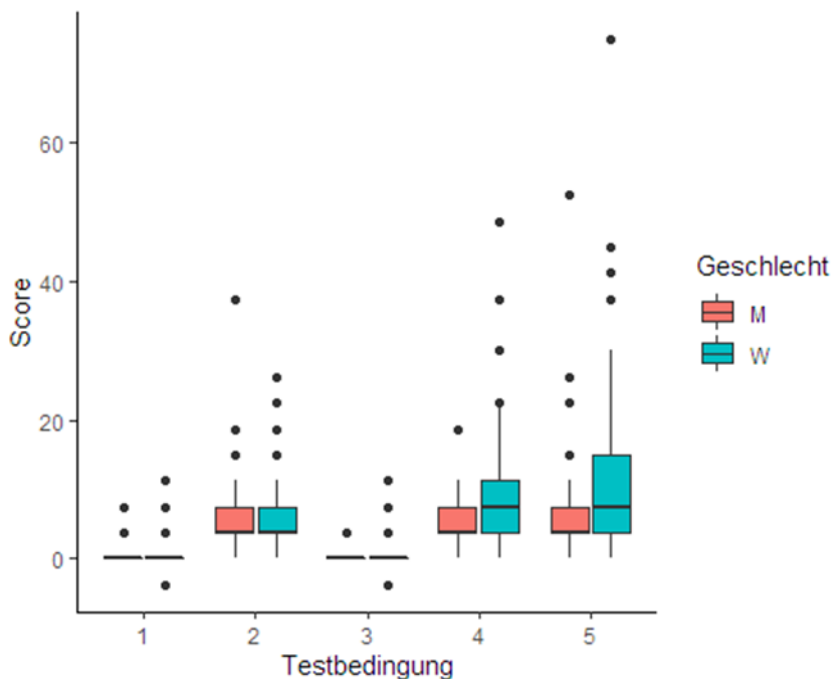


Abbildung 4-10: Totalscores nach Geschlecht eigene Darstellung)

	N	%	M T1	M T2	M T3	M T4	M T5
m	46	41.4	0.73	5.61	0.33	5.20	6.99
w	65	58.6	0.29	6.90	1.09	8.69	11.74

	N	%	Md T1	Md T2	Md T3	Md T4	Md T5	IQR T1	IQR T2	IQR T3	IQR T4	IQR T5
m	46	41.4	0	3.74	0	3.74	3.74	0	3.74	0	3.74	3.74
w	65	58.6	0	3.74	0	7.48	7.48	0	3.74	0	7.48	11.22

Tabelle 4-9: Deskriptive Statistik, Geschlecht

Test	statistic.W	z_val.W	p.value	r_rank_biserial
1	1697.0	2.239	0.025	0.135
2	1262.0	-1.431	0.153	-0.156
3	1356.0	-1.324	0.186	-0.093
4	1252.0	-1.478	0.139	-0.163
5	1091.5	-2.452	0.014	-0.270

Tabelle 4-10: Posthoc tests Geschlecht (m vs. f) innerhalb der Untertests

4.6.2 Analyse der Einflussfaktoren – Fehlsichtigkeit

Bei der Analyse zum Einfluss der Fehlsichtigkeit innerhalb der Untertests zeigte sich für keine der Bewegungsmethoden ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen (Anhang 12.6.3, Tabelle 12-5).

Innerhalb der einzelnen Fehlsichtigkeitsgruppen zeigten sich für keine der Gruppen ein signifikanter Unterschied zwischen den auf *Fließbewegung* basierenden Bewegungsmethoden (T2, T4 und T5). Für die Gruppen 0 (normalsichtig), 1 (kurzsichtig) und 2 (weitsichtig) zeigten sich ansonsten keine abweichenden Effekte gegenüber den Ergebnissen des Totalscores des Gesamtkollektivs aus 4.4. Insbesondere zeigte sich erneut kein signifikanter Unterschied zwischen T1 (natürliches Laufen) und T3 (*Teleportation*) sowie eine signifikant höhere Punktzahl für T2 (*Fließbewegung aktiv*) (Anhang 12.6.3, Tabelle 12-6).

Gruppe 3 (weit und kurzsichtig) ist für eine statistische Auswertung zu klein (n=2).

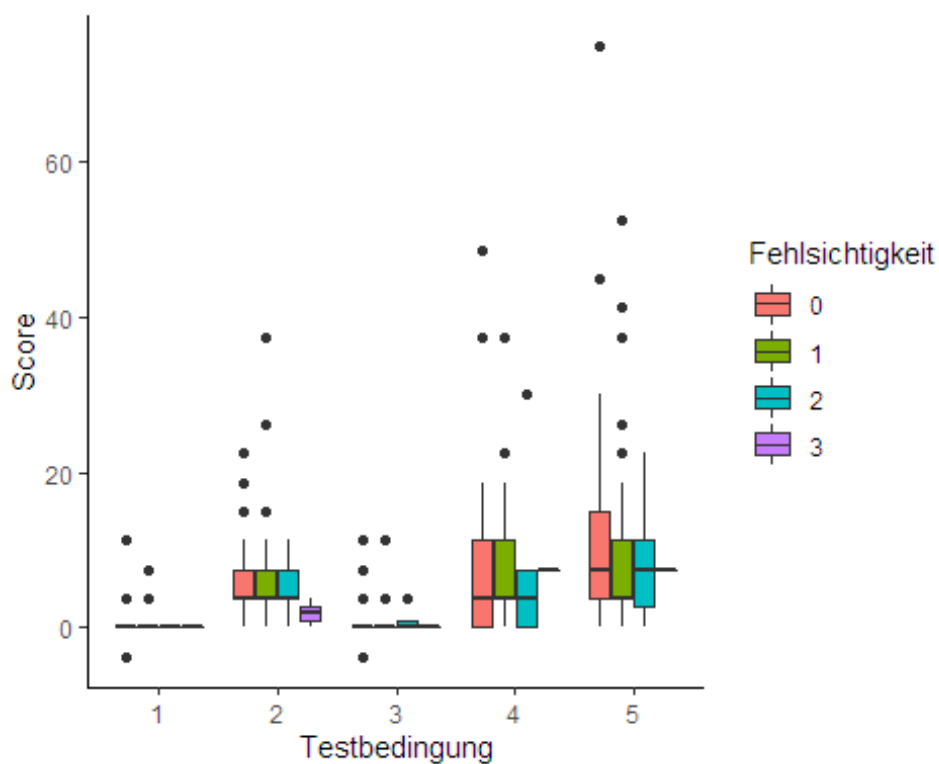


Abbildung 4-11: Totalscores nach Fehlsichtigkeitsgruppen (eigene Darstellung)

		N	%	M T1	M T2	M T3	M T4	M T5
0		56	50.5	0.40	6.41	0.94	7.21	10.55
1		41	36.9	0.73	6.84	0.55	7.66	9.40
2		12	10.8	0.00	5.30	0.94	5.92	7.79
3		2	1.8	0.00	1.87	0.00	7.48	7.48

	N	%	Md T1	Md T2	Md T3	Md T4	Md T5	IQR T1	IQR T2	IQR T3	IQR T4	IQR T5
0	56	50.5	0	3.74	0	3.74	7.48	0	3.74	0.000	11.22	11.220
1	41	36.9	0	3.74	0	3.74	3.74	0	3.74	0.000	7.48	7.480
2	12	10.8	0	3.74	0	3.74	7.48	0	3.74	0.935	7.48	8.415
3	2	1.8	0	1.87	0	7.48	7.48	0	1.87	0.000	0.00	0.000

Tabelle 4-11: Deskriptive Statistik, Fehlsichtigkeit

4.6.3 Analyse der Einflussfaktoren – Vorerfahrung mit VR-Systemen

Bei der Analyse zum Einfluss der VR-Vorerfahrung innerhalb der Untertests zeigt sich in keinem der Tests ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen (Anhang 12.6.4, Tabelle 12-7).

Innerhalb der einzelnen VR-Vorerfahrungsgruppen zeigten sich innerhalb der Gruppen 0, 1 und 2 für keine der Gruppen ein signifikanter Unterschied zwischen den auf *Fließbewegung* basierenden Bewegungsmethoden (T2, T4 und T5). Es zeigen sich ansonsten keine abweichenden Effekte gegenüber den Ergebnissen des Totalscores des Gesamtkollektivs aus 4.4. Insbesondere zeigte sich erneut kein signifikanter Unterschied zwischen T1 (natürliches Laufen) und T3 (*Teleportation*) sowie erneut eine signifikant höhere Punktzahl für T2 (*Fließbewegung aktiv*) verglichen mit T1 als auch verglichen mit T3 (Anhang 12.6.4, Tabelle 12-8).

Die Gruppen für ausführliche VR-Vorerfahrung (3 und 4) sind für eine statistische Analyse zu klein (n=3 und n=2) (Tabelle 4-12, Anhang 12.6.4, Tabelle 12-8).

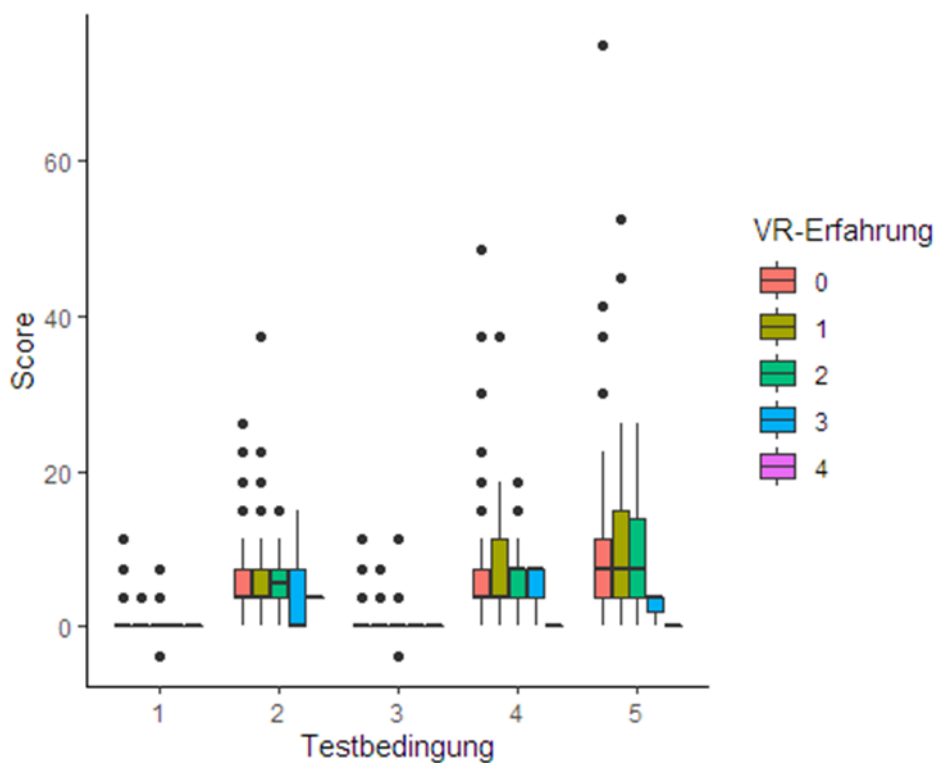


Abbildung 4-12: Totalscores der VR-Vorerfahrungsgruppen (eigene Darstellung)

	N	%	M T1	M T2	M T3	M T4	M T5
0	63	56.8	0.59	6.17	0.77	7.66	9.32
1	25	22.5	0.30	7.48	0.75	7.48	12.57
2	18	16.2	0.42	6.03	1.04	6.65	9.77
3	3	2.7	0.00	4.99	0.00	4.99	2.49
4	2	1.8	0.00	3.74	0.00	0.00	0.00

	Freq	Freq.1	Md T1	Md T2	Md T3	Md T4	Md T5	IQR T1	IQR T2	IQR T3	IQR T4	IQR T5
0	63	56.8	0	3.74	0	3.74	7.48	0	3.74	0	3.74	7.480
1	25	22.5	0	3.74	0	3.74	7.48	0	3.74	0	7.48	11.220
2	18	16.2	0	5.61	0	7.48	7.48	0	3.74	0	3.74	10.285
3	3	2.7	0	0.00	0	7.48	3.74	0	7.48	0	3.74	1.870
4	2	1.8	0	3.74	0	0.00	0.00	0	0.00	0	0.00	0.000

Tabelle 4-12: Deskriptive Statistik, VR-Vorerfahrung

4.6.4 Analyse der Einflussfaktoren – Selbsteinschätzung Reisekrankheit

Bei der Analyse zum Einfluss der Selbsteinschätzung für die Anfälligkeit für Reisekrankheit innerhalb der Untertests zeigten sich signifikante Unterschiede ($p < 0,05$). Die Gruppe „hohe Anfälligkeit“ zeigte höhere Punktwerte in T2 (*Fließbewegung aktiv*), T3 (*Teleportation*) und T5 (*Fließbewegung passiv mit Schräge*) verglichen mit der Gruppe „niedrige Anfälligkeit“.

Weiterhin zeigte die Gruppe „hohe Anfälligkeit“ in T4 (*Fließbewegung passiv*) und T5 (*Fließbewegung passiv mit Schräge*) auch signifikant höheren Punktzahlen als die Gruppe „mittlere Anfälligkeit“.

Zwischen den Selbsteinschätzungsgruppen „niedrige Anfälligkeit“ und „mittlere Anfälligkeit“ zeigte sich für keine der getesteten Bewegungsmethoden ein signifikanter Unterschied (Tabelle 4-14).

Bei den Vergleichen der Bewegungsmethoden untereinander innerhalb der Ausprägungsgruppen (hohe, mittlere, geringe Anfälligkeit), zeigte sich für keine der Gruppen ein sig-

nifikanter Unterschied zwischen den auf Fließbewegung basierenden Bewegungsmethoden (T2, T4 und T5). Es zeigen sich ansonsten keine abweichenden Effekte gegenüber den Ergebnissen des Totalscores des Gesamtkollektivs aus 4.4. Insbesondere zeigte sich erneut kein signifikanter Unterschied zwischen T1 (natürliches Laufen) und T3 (*Teleportation*) sowie erneut eine signifikant höhere Punktzahl für T2 (*Fließbewegung aktiv*) verglichen mit T1 als auch verglichen mit T3 (Anhang 12.6.5, Tabelle 12-9).

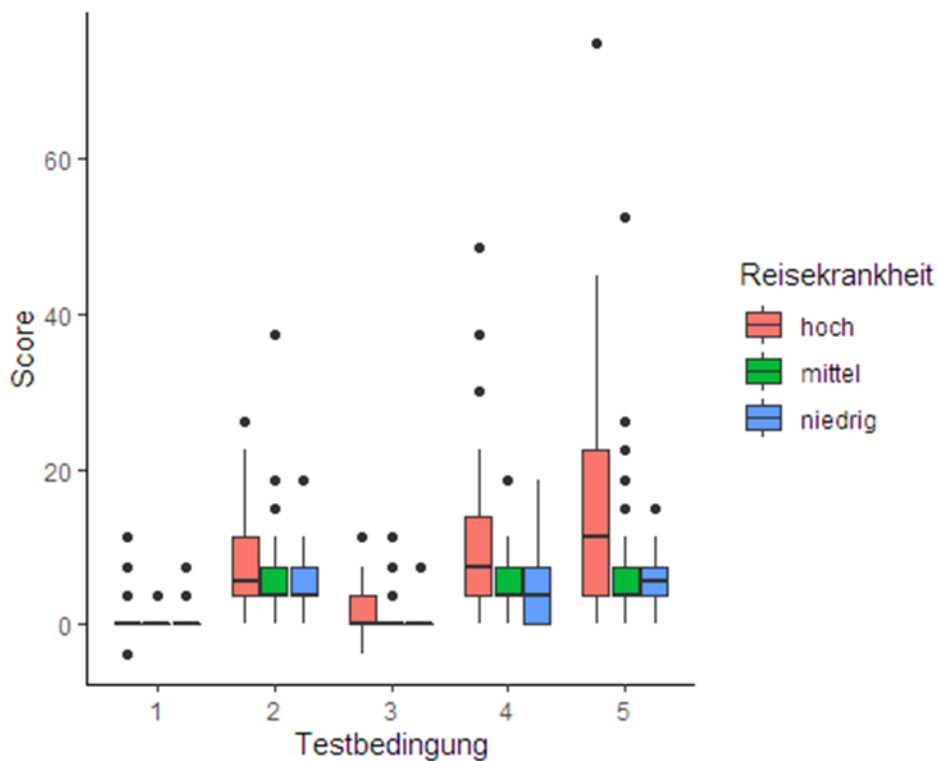


Abbildung 4-13: Totalscores der Selbsteinschätzungsgruppen Reisekrankheit

	N	%	M T1	M T2	M T3	M T4	M T5
Niedrig	28	25.2	0.67	4.94	0.27	5.34	6.01
Mittel	45	40.5	0.25	5.73	0.58	5.48	7.73
Hoch	38	34.2	0.59	8.17	1.38	10.73	14.96

	N	%	Md T1	Md T2	Md T3	Md T4	Md T5
Niedrig	28	25.2	0	3.74	0	3.74	5.61
Mittel	45	40.5	0	3.74	0	3.74	3.74
Hoch	38	34.2	0	5.61	0	7.48	11.22

	N	%	IQR T1	IQR T2	IQR T3	IQR T4	IQR T5
Niedrig	28	25.2	0	3.74	0.00	7.48	3.74
Mittel	45	40.5	0	3.74	0.00	3.74	3.74
Hoch	38	34.2	0	7.48	3.74	10.29	18.70

Tabelle 4-13: Deskriptive Statistik, Selbsteinschätzung Reisekrankheit

	statistic.W	z_val.W	p.value	r_rank_biserial
1:Niedrig_Mittel	681.0	1.122	0.262	0.081
1:Niedrig_Hoch	561.0	0.620	0.535	0.055
1:Mittel_Hoch	839.0	-0.277	0.782	-0.019
2:Niedrig_Mittel	576.5	-0.624	0.533	-0.085
2:Niedrig_Hoch	383.0	-1.966	0.049	-0.280
2:Mittel_Hoch	674.0	-1.695	0.090	-0.212
3:Niedrig_Mittel	596.5	-0.855	0.393	-0.053
3:Niedrig_Hoch	413.0	-2.217	0.027	-0.224
3:Mittel_Hoch	709.0	-1.934	0.053	-0.171
4:Niedrig_Mittel	609.5	-0.233	0.816	-0.033
4:Niedrig_Hoch	386.5	-1.911	0.056	-0.273
4:Mittel_Hoch	637.5	-2.024	0.043	-0.254
5:Niedrig_Mittel	584.5	-0.523	0.601	-0.072
5:Niedrig_Hoch	333.0	-2.604	0.009	-0.374
5:Mittel_Hoch	599.0	-2.372	0.018	-0.299

Tabelle 4-14: Posthoc tests Ausprägung Reisekrankheit innerhalb Untertests

4.6.5 Analyse der Einflussfaktoren – Sport

Bei der Analyse des Einflusses von Sportstunden pro Woche innerhalb der Untertests zeigt sich in keinem der Tests ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen (Anhang 12.6.6, Tabelle 12-10).

Für die Posthocvergleiche der Untertests innerhalb der sportlichen Aktivitätsgruppen zeigten sich für keine der Gruppen ein signifikanter Unterschied zwischen den auf Fließbewegung basierenden Bewegungsmethoden (T2, T4 und T5). Es zeigen sich ansonsten keine abweichenden Effekte gegenüber den Ergebnissen des Totalscores des Gesamtkollektivs aus 4.4. Insbesondere zeigte sich erneut kein signifikanter Unterschied zwischen T1 (natürliches Laufen) und T3 (*Teleportation*) sowie erneut eine signifikant höhere Punktzahl für T2 (*Fließbewegung aktiv*) sowohl verglichen mit T1 als auch mit T3 (Anhang 12.6.6, Tabelle 12-11).

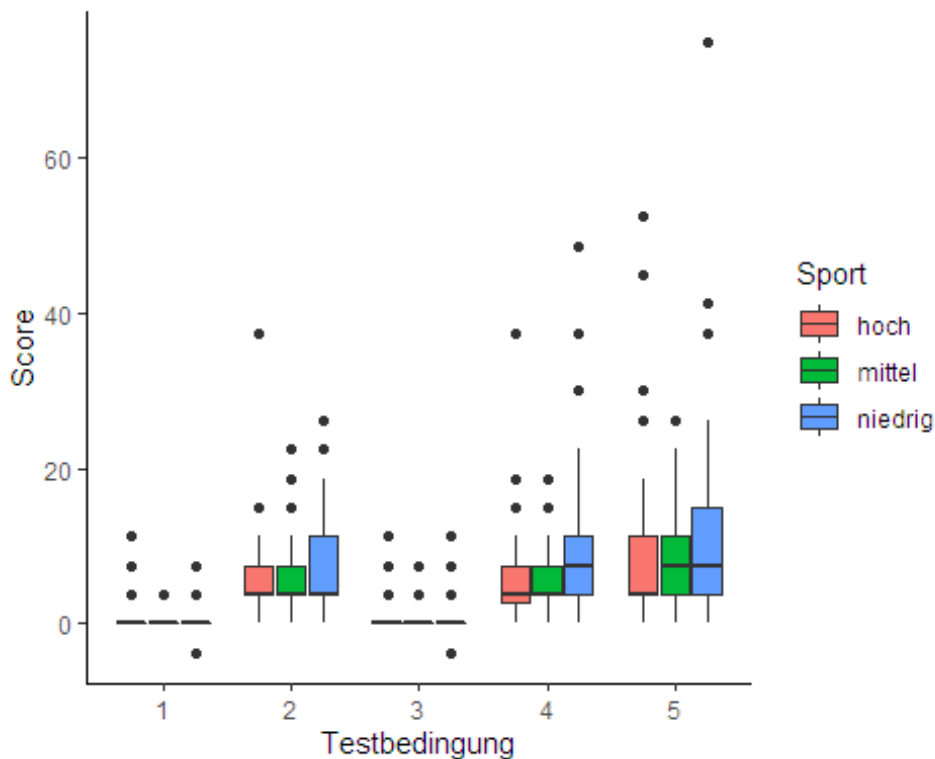


Abbildung 4-14: Totalscores der Gruppen an sportlicher Aktivität (eigene Darstellung)

	N	%	M T1	M T2	M T3	M T4	M T5
Niedrig	35	31.5	0.32	7.27	0.96	9.94	11.97
Mittel	36	32.4	0.21	6.23	0.52	5.71	8.52
Hoch	40	36.0	0.84	5.70	0.84	6.26	8.98

	N	%	Md T1	Md T2	Md T3	Md T4	Md T5	IQR T1	IQR T2	IQR T3	IQR T4	IQR T5
Nie-drig	35	31.5	0	3.74	0	7.48	7.48	0	7.48	0	7.480	11.22
Mit-tel	36	32.4	0	3.74	0	3.74	7.48	0	3.74	0	3.740	7.48
Hoch	40	36.0	0	3.74	0	3.74	3.74	0	3.74	0	4.675	7.48

Tabelle 4-15: Deskriptive Statistik, Sport

4.6.6 Analyse der Einflussfaktoren – Alter

Bei der Analyse eines Einflusses des Alters innerhalb der Untertests zeigt sich in keinem der Tests ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen ≥ 50 und ≤ 49 (Tabelle 4-17).

Für die Posthocvergleiche der Untertests innerhalb der Altersgruppen zeigten sich für die Altersgruppe ≤ 49 kein signifikanter Unterschied zwischen den auf *Fließbewegung* basierenden Bewegungsmethoden (T2, T4 und T5).

In der Altersgruppe ≥ 50 jedoch zeigten sich jedoch als einzige aller betrachteter Subgruppen ein signifikanter Unterschied zwischen den Scores der Bewegungsmethoden T2 (*Fließbewegung aktiv*) und T4 (*Fließbewegung passiv*) ($p=0,025$) mit höheren Scores für T4. Ebenfalls zeigten sich wieder signifikante Unterschiede zwischen T2 (*Fließbewegung aktiv*) und T5 (*Fließbewegung passiv mit Schräge*). Es zeigten sich ansonsten keine abweichenden Effekte gegenüber den Ergebnissen des Totalscores des Gesamtkollektivs aus 4.4. Insbesondere zeigte sich erneut kein signifikanter Unterschied zwischen T1 (natürliches Laufen) und T3 (*Teleportation*) sowie erneut eine signifikant höhere Punktzahl für T2 (*Fließbewegung aktiv*) verglichen mit T1 als auch T3 (Anhang 12.6.7, Tabelle 12-12).

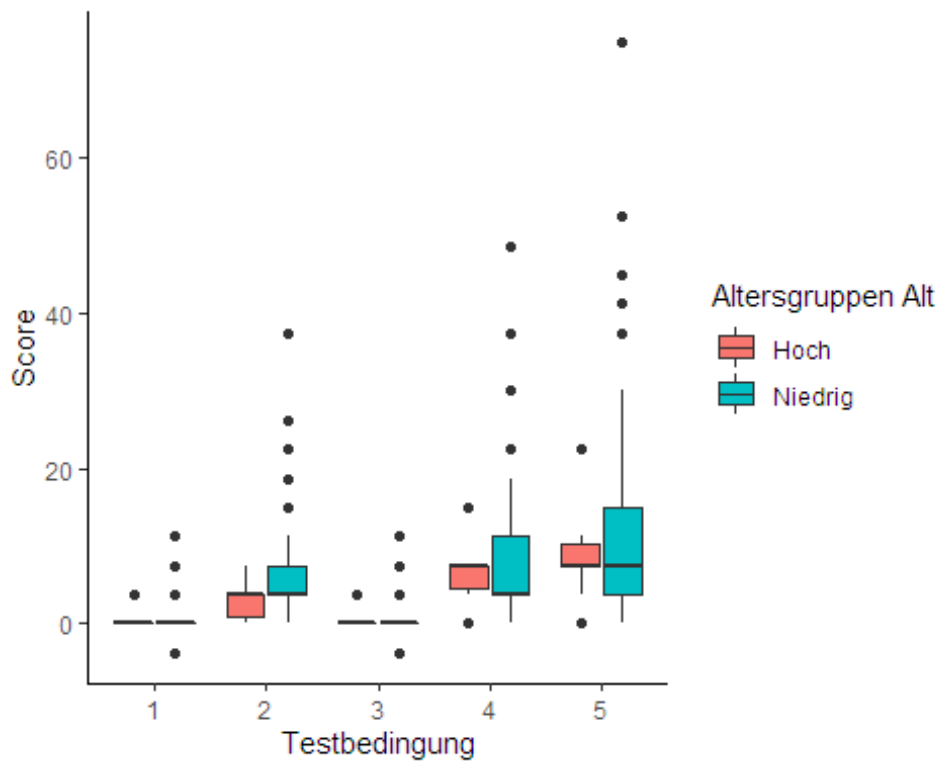


Abbildung 4-15: Totalscores der Altersgruppen ≤ 49 J und ≥ 50 (eigene Darstellung)

Alter	N	%	M T1	M T2	M T3	M T4	M T5
≤ 49	101	91	0.48	6.70	0.78	7.33	9.89
≥ 50	10	9	0.37	2.99	0.75	6.36	8.60

Al- ter	N	%	Md T1	Md T2	Md T3	Md T4	Md T5	IQR T1	IQR T2	IQR T3	IQR T4	IQR T5
≤ 49	101	91	0	3.74	0	7.48	7.48	0	2.81	0	2.81	2.81
≥ 50	10	9	0	3.74	0	3.74	7.48	0	3.74	0	7.48	11.22

Tabelle 4-16: Deskriptive Statistik Altersgruppen (≤ 49 J vs. ≥ 50)

	statistic.W	z_val.W	p.value	r_rank_biserial
≥50 J 1_2	19.0	-2.647	0.008	-0.620
≥50 J 1_3	45.0	-0.549	0.583	-0.100
≥50 J 1_4	11.0	-3.237	0.001	-0.780
≥50 J 1_5	6.0	-3.530	< 0.001	-0.880
≥50 J 2_3	77.0	2.250	0.024	0.540
≥50 J 2_4	21.5	-2.198	0.028	-0.570
≥50 J 2_5	15.0	-2.674	0.007	-0.700
≥50 J 3_4	12.0	-3.077	0.002	-0.760
≥50 J 3_5	7.0	-3.388	0.001	-0.860
≥50 J 4_5	36.0	-1.092	0.275	-0.280
≤49 J 1_2	1228.0	-10.153	< 0.001	-0.759
≤49 J 1_3	4886.5	-0.884	0.377	-0.042
≤49 J 1_4	1514.5	-9.534	< 0.001	-0.703
≤49 J 1_5	1172.5	-10.284	< 0.001	-0.770
≤49 J 2_3	8738.5	9.453	< 0.001	0.713
≤49 J 2_4	5175.5	0.183	0.855	0.015
≤49 J 2_5	4535.5	-1.388	0.165	-0.111
≤49 J 3_4	1728.5	-8.872	< 0.001	-0.661
≤49 J 3_5	1373.5	-9.671	< 0.001	-0.731
≤49 J 4_5	4495.5	-1.482	0.138	-0.119

Tabelle 4-17: 2 Posthoc tests Alter, Untertests innerhalb Ausprägung

5 Diskussion

Virtual Reality hat sich in den letzten Jahren zunehmend etabliert und eine weitere Verbreitung dieser Technologie ist zu erwarten. Sie eröffnet eine Vielzahl möglicher Anwendungsfälle, auch im medizinischen Bereich. Simulatorkrankheit (SK) stellt sich jedoch als ein potenzieller Problemfaktor dar, der die Etablierung und das Potenzial von VR behindern könnte. Daher besteht ein Interesse daran, die auslösenden Faktoren von SK in VR besser zu verstehen. Einer der Faktoren, der das Auftreten von SK in VR zu begünstigen scheint, ist der Einsatz künstlicher Bewegungsmethoden. Eine effektive Untersuchung der Verträglichkeit dieser Bewegungsmethoden wird jedoch dadurch erschwert, dass die in VR dargestellten Simulationsumgebungen unabhängig Symptome einer SK auslösen kann, was Ergebnisse potenziell verfälscht.

Ein Ziel dieser Arbeit war die Erstellung einer Software, mit der Studien über die Verträglichkeit von Bewegungsmethoden in VR standardisiert durchgeführt werden können. Dazu sollte die Simulationsumgebung so gestaltet werden, dass sie möglichst keinen Einfluss auf Symptome nimmt und ein Testdesign ermöglicht, in dem künstliche Bewegungsmethoden direkt mit natürlichem Laufen verglichen werden können.

Das zweite Ziel dieser Arbeit war es, diesen Vergleich zu nutzen, um zu evaluieren, inwiefern die entwickelte Software (in Kombination mit der eingesetzten Hardware) Symptome einer SK auslöst bzw. ob sie erfolgreich in ihrem Bestreben ist, diese zu minimieren.

Als drittes Ziel sollte, überprüft werden, ob die Software umgekehrt in der Lage ist, durch den SSQ erfassbare Symptome einer SK durch die Verwendung künstlicher Bewegungsmethoden auszulösen.

Viertes Ziel der Arbeit war zu überprüfen, ob in der durchgeführten Testreihe für eine Reihe von in der Literatur diskutierter Einflussfaktoren, ein Einfluss auf die Verträglichkeit der VR-Umgebung bzw. der Bewegungsmethoden nachgewiesen werden kann.

Die Software wurde in *Unreal Engine 4* entwickelt und Tests mit dem VR-Headset *HTC Vive* der Firma HTC durchgeführt. Die Auswahl des Headsets erfolgte, da es sich zum damaligen Zeitpunkt um eines der modernsten VR-Headsets handelte. Insbesondere die Positionsbestimmung durch die *lighthouse*-Stationen erlaubte eine präzise Bewegungsverfolgung in einem großen Areal. Dadurch wurde es möglich, natürliches Laufen direkt mit künstlichen Bewegungsmethoden zu vergleichen. Aufgrund dieses Testdesigns konnte

im Rahmen der durchgeführten Studie gezeigt werden, dass die Software im Falle von natürlichem Laufen keine durch den SSQ nachweisbaren Symptome einer SK bei den Probanden auslöste, während dies bei einem Teil der künstlichen Bewegungsmethoden der Fall war. Die Software scheint somit als neutrale Testplattform geeignet.

Für die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Versuche wurden einige Basisbewegungsmethoden implementiert und es war einem einzelnen Untersucher möglich, sämtliche Tests alleine – ohne eine weitere Person außer dem Probanden – durchzuführen.

Die Software ist auch für einen Benutzer mit geringerem Kenntnisstand im Umgang mit *Unreal Engine 4* schnell anpassbar. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit, die Software mit geringem Aufwand für andere Testszenarien zu modifizieren und zu verwenden. So müssen beispielsweise für eine Anpassung der Zielpunkte lediglich einige Koordinaten in einer Tabelle angepasst werden. Da *Unreal Engine* eine verbreitete Entwicklungsplattform für VR-Entwicklung ist, existieren online mittlerweile zahlreiche (teils kostenlose) Vorlagen und Anleitungen für die Umsetzung weiterer Bewegungsmethoden, die sich mit wenigen Mausklicks in ein Projekt implementieren lassen und somit zu der hier entwickelten Software mit minimalem Aufwand hinzugefügt werden könnten [207]–[209].

Um die Zugänglichkeit der Software weiter zu erhöhen, wäre für die Zukunft die Implementation einer graphischen Nutzeroberfläche ein sinnvoller Schritt. So könnte die Bedienung der Software weiter vereinfacht werden, um beispielsweise eine Auswahl der Bewegungsmethoden durch klickbare Schaltflächen zu ermöglichen. Auch einfache Anpassungen wie die dargestellte virtuelle Raumgröße und die anzusteuernenden Zielpunkte ließen sich hier integrieren, um die Software anpassbar für Nutzer zu machen, die über keine Kenntnisse im Umgang mit *Unreal Engine 4* verfügen oder nicht direkt mit der Entwicklungsumgebung interagieren möchten.

Eine Herausforderung in der Entwicklung war, dass der ursprüngliche Plan eines komplett weißen Raumes verlassen werden musste, da dies in Vortests zu Desorientierung der Probanden führte, mutmaßlich aufgrund unzureichender Orientierungspunkte im Raum. Daher wurden minimale Dekorationen hinzugefügt, um eine möglichst hohe Verträglichkeit zu erreichen.

Im Anschluss an die Entwicklung der Software wurde eine Studie mit einer großen Probandenanzahl durchgeführt. Zum einen diente dies der Überprüfung, ob die Softwareentwicklung erfolgreich in ihrem Ziel war, Symptome durch die dargestellte Testumgebung zu minimieren und umgekehrt einen messbaren Symptomanstieg durch bestimmte künstliche Bewegungsmethoden zu erzielen. Die Ergebnisse der mit 111 Probanden durchgeführten Studie lassen darauf schließen, dass diese Ziele erreicht wurden, da sich keine Erhöhung der SSQ-Werte bei Verwendung von natürlichem Laufen darstellen ließ.

Fließbewegung wurde grundsätzlich schlechter vertragen wurde als *Teleportation* oder natürliches Laufen, was sich mit bisherigen Erkenntnissen anderer Forschungsgruppen, deckt [41], [42], [109].

Es ließ sich jedoch kein Unterschied zwischen nutzerkontrollierter *Fließbewegung* und passiver *Fließbewegung* erkennen (mit Ausnahme der Altersgruppe >50 Jahre). Dies überrascht insofern, da passive Bewegungen in anderen Studien in der Regel zu ausgeprägterer Simulatorkrankheit führten als aktiv kontrollierte. Auch außerhalb von Simulationsumgebungen treten Kinetosen in der Regel häufiger bei passiven Bewegungen als bei aktiv kontrollierten auf [42], [43], [131], [136], [189], [190].

Eine mögliche Erklärung hierfür könnte eine Beeinflussung der Ergebnisse durch die Testreihenfolge sein. *Aktiv kontrollierte Fließbewegung* wurde zeitlich vor *passiver Fließbewegung* getestet. Es wäre denkbar, dass die Probanden sich auf die Tests einstellten und die zunehmende Gewöhnung an die Situation dazu führte, dass sie den passiven Test besser vertrugen. Allerdings ist zu beachten, dass *Fließbewegung aktiv* bereits den zweiten Testdurchlauf (bzw. den ersten einer künstlichen Bewegungsmethode) darstellte und mit sehr viel höheren SSQ-werten einherging als *Teleportation*, welches als drittes – also danach – getestet wurde. Die als viertes getestete Bewegungsmethode *Fließbewegung passiv* ging hingegen erneut mit wesentlich höheren Punktzahlen einher als die zuvor getestete *Teleportation*. Die Testreihenfolge erscheint – zumindest als alleinige Erklärung – daher als ungeeignet, um die vergleichbaren Ergebnisse für *Fließbewegung aktiv* und *Fließbewegung passiv* zu erklären.

Ein weitere Erklärungsansatz, der sich aus der Testreihenfolge ergibt, wäre eine Gewöhnung der Probanden, nicht aufgrund des bekannten Testablaufs, sondern aufgrund der

andauernden Expositionsdauer von VR. Andere Studien, die den Einfluss der Expositionsdauer von VR auf das Auftreten von SK untersuchen, kommen jedoch in der Regel zu dem Ergebnis, dass eine lang anhaltende Expositionsdauer zunächst zu steigenden, nicht sinkenden Symptomen führt [39], [191]. Speziell kamen Saredakis *et al.* 2020 in einer Metastudie von VR-Studien zu dem Ergebnis, dass eine Zunahme von Symptomen besonders unterhalb von 20 Minuten Expositionsdauer zu beobachten sei, darüber jedoch wieder eine Abnahme [42]. Es wäre jedoch denkbar, dass die Unterschiede zwischen aktiv kontrollierter und passiver *Fließbewegung* – zumindest in der Form wie hier getestet – so gering sind, dass sie sich erst bei länger anhaltender Symptombdauer im SSQ darstellen.

Schlussendlich sind weitere Untersuchungen notwendig – idealerweise mit Probanden in randomisierten Bewegungsgruppen – um zu validieren, ob passive und aktive fließende Bewegungen tatsächlich nur zu geringen Unterschieden in den ausgelösten Symptomen führen.

Die letzte getestete Bewegungsmethode *Fließbewegung passiv mit Schräge*, zeigte innerhalb des Gesamtkollektivs höhere SSQ-Werte als *Fließbewegung passiv*, was auf eine schlechtere Verträglichkeit durch die zusätzliche vertikale Bewegungskomponente hinweist. Dies passt grundsätzlich zu der Annahme, dass die Stärke erlebter SK davon abhängt, wie hoch die Gesamtdifferenz in den Sinneseindrücken des zugrunde liegenden sensorischen Konfliktes ist [46].

Weiterhin wäre es auch in diesem Fall nicht auszuschließen, dass eine Beeinflussung durch die Testreihenfolge stattgefunden hat. Es erscheint also auch hier angebracht weitere Tests mit größeren Probandenkollektiven, längeren Expositionsauern und/oder randomisierter Testreihenfolge durchzuführen. Die gewonnenen Daten legen jedoch nahe, dass die zusätzliche Einführung von vertikalen Bewegungen eine schlechtere Verträglichkeit von VR-Software zur Folge hat. Dies bedeutet, dass in der Softwareentwicklung von VR-Anwendungen angestrebt werden sollte, möglichst ebene Untergründe zu simulieren, um eine maximale Verträglichkeit zu erreichen. Dies könnte auch einen Erklärungsansatz für die berichtete schlechtere Verträglichkeit von Spielesoftware in VR darstellen, da dies im Leveldesign von Spielen eventuell nicht berücksichtigt wird.

Innerhalb des Gesamtkollektivs zeigte sich weiterhin, dass *Teleportation* vergleichbar gut vertragen wurde wie natürliches Laufen. Auch wenn *Teleportation* sich bereits in anderen Studien als die verträglichste künstliche Bewegungsmethode zeigte, überrascht es, dass sich kein relevanter Unterschied zu natürlichem Laufen zeigte [41], [56], [61], [108], [109].

Es zeigten sich unterschiedlich starke Effekte auf den Subskalen über die Tests, wobei sich die höchste Effektstärke auf der Skala *Disorientation* zeigte, ein schwächerer Effekt auf der Skala *Nausea*. Auf der Skala *Oculomotor* ließ sich kein Effekt nachweisen. Kennedy *et al.* – die Autoren des SSQ – beschreiben als Verteilung für *Cybersickness* ebenfalls die stärksten Symptome auf der Skala *Disorientation* und die schwächsten auf der Skala *Oculomotor* [155].

In einigen VR-Studien zeigte sich jedoch – im Gegensatz zu den in dieser Arbeit gewonnenen Ergebnissen – auch ein Effekt auf der Skala *Oculomotor* [42], [65], [157], [158]. So *et al.* berichteten 2001 in ihrer Studie, die den Einfluss von Navigationsgeschwindigkeit bei *Fließbewegung* in VR untersuchte, sogar den stärksten Effekt auf der Skala *Oculomotor* [66].

Eine mögliche Erklärung für die Abweichung zu den Ergebnissen von So *et al.* wäre die Bewegungsgeschwindigkeit. Das Bewegungstempo von 2m/s wurde in dieser Studie unter anderem gewählt, da So *et al.* einen Anstieg der SSQ-Symptome ab 3m/s berichteten. Es wäre also denkbar, dass die Abwesenheit eines Effekts auf der Oculomotorskala ein direktes Resultat der niedrigen Geschwindigkeit war. Weitere Tests der vorgeschlagenen Software, in denen Bewegungsgeschwindigkeiten direkt verglichen werden, wären ratsam.

Bei der Betrachtung der einzelnen Fragen des SSQ fiel auf, dass nur die Hälfte der Items einen nennenswerten Effekt in Abhängigkeit von der Bewegungsmethode zeigte. Hervorsticht hierbei Frage 12 (Schwindel bei geöffneten Augen) als das Item mit dem mit Abstand stärksten Effekt. Diese Erkenntnisse könnten genutzt werden, um einen VR-spezifischeren Fragebogen als Abwandlung des SSQ zu entwickeln, jedoch sollte hierbei beachtet werden, dass diese Arbeit sich lediglich mit dem Aspekt der Bewegung in VR beschäftigt. Andere Aspekte wie „Arbeiten in VR“ könnten zu einer anderen Gewichtung der Parameter führen. So kamen Kim *et al.* 2018 in einer Studie, die einen angepassten

VR-Fragebogen zu entwickeln versuchte, zu dem Ergebnis, Item 12 aus dem SSQ komplett zu streichen. Item 12 war hingegen in der vorliegenden Studie das Item, was die mit Abstand größte Effektstärke zeigte. In der Studie von Kim *et al.* wurde der Aspekt der Bewegung in VR jedoch nicht erfasst sondern sich ausschließlich auf blick- und control-lergesteuerte Interaktionen beschränkt [76]. Dies verdeutlicht die Schwierigkeit der Entwicklung spezieller Fragebögen zur Erfassung von Kinetosen in VR. Da die möglichen Anwendungsfelder sehr breit gestreut sind, unterscheiden sich auch die dargestellten Situationen und somit Anforderungen erheblich.

Es konnte ein leichter Einfluss des Faktors Geschlecht beobachtet werden, wobei die männlichen Probanden leicht höhere Werte in Test 1 (natürliches Laufen) zeigten und umgekehrt die weiblichen Probanden höhere Werte in Test 5 (*Fließbewegung passiv mit Schräge*). Auffällig ist jedoch vor allem, dass die Subgruppe der weiblichen Probanden bei *Teleportation* signifikant höhere SSQ-Werte aufwiesen als bei natürlichem Laufen. Dies steht im Gegensatz zu den weiter oben beschriebenen Ergebnissen des Gesamtkollektivs, bei denen sich eine ähnlich gute Verträglichkeit zwischen *Teleportation* und natürlichem Laufen zeigte.

Wie unter Kapitel 3.6.2 beschrieben wird in der Literatur eine höhere Anfälligkeit für Frauen berichtet [64], [65], [137], [145], [168], [169]. Für diesen möglichen Effekt werden hormonelle Faktoren sowie eine genetisch unterschiedliche Prädisposition diskutiert, jedoch auch die Frage, ob männliche Probanden dazu neigen, ihre Symptome seltener bzw. weniger stark zu berichten [46], [64], [143], [146]–[148], [169], [172]. Unabhängig davon, was der Grund für den beobachteten Effekt ist, erscheint es ratsam, diese Ergebnisse in der Softwareentwicklung zu berücksichtigen und beispielsweise darauf zu achten, eine neue Software auch von weiblichen Personen evaluieren zu lassen, um ein umfassenderes Bild über Nutzerverträglichkeit zu erlangen. Die gewonnenen Daten legen nahe, dass weibliche Nutzer, im Gegensatz zu männlichen, stärker davon profitieren, wenn VR-Anwendungen den Einsatz künstlicher Bewegungsmethoden reduzieren. Im Vergleich der künstlichen Bewegungsmethoden untereinander war auch für weibliche Versuchspersonen *Teleportation* die mit Abstand verträglichste künstliche Bewegungsmethode. Auch auf Anwenderebene lassen sich Erkenntnisse ableiten, so wäre es ratsam z.B. bei der Planung eines VR-Labors ausreichende Platzverhältnisse zu schaffen die es erlauben die Verwendung von künstlichen Bewegungsmethoden möglichst zu reduzieren.

In der Altersgruppe der über 50-jährigen Probanden, zeigte sich als einzige Gruppe ein signifikanter Unterschied zwischen aktiv kontrollierter und passiver *Fließbewegung*, wobei passive *Fließbewegung* schlechter vertragen wurde. Eine mögliche Erklärung wäre, dass ältere Probanden empfindlicher auf die dargestellten Inhalte reagierten und eventuell einen nur schwach vorhandenen Unterschied (wie schon weiter oben diskutiert) stärker wahrnahmen. Ältere Menschen gelten üblicherweise als weniger anfällig für Kinetosen [42], [52], [64], [128]. Jedoch existieren – speziell für VR-Anwendungen – auch gegensätzliche Ergebnisse [137], [157]. Allerdings wies die Gruppe der Probanden über 50 Jahre in sonst keinem der weiteren Testdurchläufe signifikant höhere Werte als die jüngere Gruppe auf. Grundsätzlich wäre es auch hier möglich, dass die Testdauer eine Rolle spielte und eventuell ältere Probanden früher Symptome aufgrund der andauernden VR-Exposition zeigten. Zu beachten ist jedoch auch, dass die Anzahl der Teilnehmer mit einem Alter von über 50 Jahren mit 10 Probanden klein ausfiel. Für eine genauere Analyse des Einflusses des Alters auf die Verträglichkeit bestimmter künstlicher Bewegungsmethoden wären weitere Untersuchungen mit einer gleichmäßigeren Altersverteilung ratsam.

Um Rückschlüsse auf eine Trainierbarkeit der Verträglichkeit von VR-Bewegungsmethoden zu ziehen, wurden Teilnehmer in mehrere Gruppen nach ihrer VR-Vorerfahrung unterteilt. Die Gruppen an Teilnehmern mit ausführlicher VR-Vorerfahrung (mehr als zweimal getestet) waren jedoch so klein, dass keine Aussage über diese Nutzergruppe getroffen werden kann. Die restlichen Erfahrungsgruppen wiesen jedoch keinen signifikanten Unterschied bezüglich der Verträglichkeit der Bewegungsmethoden auf. Grundsätzlich gilt die Anfälligkeit für Kinetosen als trainierbar [43], [50], [191], [210]. Um belastbare Aussagen darüber zu treffen, ob sich die Trainierbarkeit zwischen den Bewegungsmethoden unterscheidet, sind jedoch entsprechend weitere Untersuchungen notwendig, idealerweise indem unerfahrene Probanden das Testprogramm an mehreren Tagen absolvieren. Perspektivisch wäre es auch denkbar, die Software als ein Trainingsinstrument einzusetzen, um besonders anfällige Personen für SK in VR zu desensibilisieren.

Die Probanden wurden vor Versuchsdurchführung befragt, wie sie ihre Anfälligkeit für Kinetosen in anderen Situationen beurteilten. Hierbei zeigten sich höhere Punktwerten

unter den Probanden, die ihre Anfälligkeit vorab höher bewertet hatten. Die naheliegendste Erklärung wäre, dass eine höhere Anfälligkeit in anderen Situationen auch mit einer höheren Anfälligkeit in VR einhergeht. Dies erscheint plausibel in Anbetracht der Tatsache, wie nah verwandt die verschiedenen Formen von Kinetose sind. Es ist allerdings auch denkbar, dass Probanden, die angaben, bei ihnen bestünde eine höhere Anfälligkeit für Kinetosen, bereits Symptome erwarteten und in der Folge eher berichteten. Auch für diese Probandengruppe zeigte sich *Teleportation* jedoch als die mit Abstand verträglichste Form der künstlichen Bewegung unter den getesteten Bewegungsmethoden. In Folgestudien könnte eine detailliertere Erfassung der Anfälligkeit für SK durch den Einsatz standardisierter Fragebögen, wie dem *Motion Sickness Susceptibility Questionnaire* (MSSQ), gewonnen werden [211], [212].

Die sportliche Aktivität der Probanden zeigte keinen Einfluss auf die gemessene Verträglichkeit, was den Ergebnissen einiger Studien zuwider läuft die eine höhere Anfälligkeit für sportlich aktive Personen zeigen konnten [173]–[176]. Die genannten Studien befassten sich jedoch nicht mit VR-Anwendungen, sondern mit Kinetosen in anderen Situationen. Es wäre daher denkbar, dass die durch VR ausgelöste Stimulation – zumindest in der Form wie hier getestet – nicht ausreichend ist, um einen aktivitätsabhängigen Effekt auszulösen.

Fehlsichtigkeit zeigte keinen Einfluss auf die Verträglichkeit der Bewegungsmethoden ebenso wie das Maß, in dem die Probanden Videospiele konsumierten. Entsprechend ließen sich die in Kapitel 3.6.4 bzw. Kapitel 3.6.7 (Seite 33 bzw. Seite 35) angenommenen Einflussmechanismen nicht bestätigen.

6 Zusammenfassung

Basierend auf den vorliegenden Daten kann das Fazit gezogen werden, dass die Software ihr Ziel erreicht hat, durch die dargestellte Umgebung keine ungewollten Symptome einer Simulatorkrankheit (SK) auszulösen. Sie bietet eine einfach anpassbare Plattform zur Testung von Bewegungsmethoden in Virtual Reality und kann für weitere vergleichende Tests in der Zukunft verwendet und weiter angepasst werden. Aufgrund der Umsetzung in einer in der VR-Entwicklung verbreiteten Entwicklungsumgebung sollte es für andere Forscher einfach möglich sein, die Software als Basis zur Testung experimenteller Bewegungsmethoden in VR zu nutzen.

Aus den in der durchgeführten Studie gewonnenen Daten lassen sich darüber hinaus Erkenntnisse ableiten, die Entwicklern helfen könnten, in Zukunft verträglichere VR-Software zu entwickeln. Auch Anwendern könnten die Erkenntnisse dieser Studie helfen, VR in einer möglichst verträglichen Form einzusetzen. So zeigte sich natürliches Laufen unter den getesteten Bewegungsmethoden als die verträglichste Bewegungsform. Um die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Simulatorkrankheit zu minimieren, sollte daher versucht werden möglichst angemessene Platzverhältnisse zur Verfügung zu stellen, so dass die Verwendung von künstlichen Bewegungsmethoden auf ein Minimum reduziert, oder ganz vermieden, werden kann. In Fällen in denen dies nicht möglich oder nicht gewünscht ist, scheint *Teleportation* eine für viele Nutzer gut verträgliche Alternative darzustellen. Basierend auf den gewonnenen Daten geht *Fließbewegung* hingegen mit einer deutlichen Zunahme an Symptomen einer Simulatorkrankheit einher. Da eine grundsätzliche Trainierbarkeit von Kinetosen in der Literatur ausführlich belegt ist, wäre es darüber hinaus denkbar die vorgeschlagene Software als ein Trainingsinstrument für SK in VR einzusetzen.

Weiterhin sei erwähnt, dass der Bereich der Virtual Reality – wie viele technische Bereiche – einer konstanten Weiterentwicklung unterliegt. Seit Durchführung der Studie sind neuere Headsets erschienen, die sich unter anderem in ihrer Auflösung, Bildwiederholrate sowie ihrer Optiken weiterentwickelt haben. Die dargestellten Ergebnisse müssen daher als eine Momentaufnahme verstanden werden. Da sich in der Arbeit aber primär auf den Vergleich der Bewegungsmethoden untereinander konzentriert wurde, ist anzunehmen,

dass die erhobenen Daten weitestgehend unabhängig von der technischen Plattform gelten.

Insgesamt ist es die Ansicht des Autors, dass die entwickelte Software sowie die Ergebnisse der durchgeführten Studie einen Beitrag zum besseren Verständnis der Simulatorkrankheit in VR-Umgebungen leisten und zukünftige strukturierte Forschung vereinfachen. Dadurch wird ein Beitrag geleistet, um die Forschung in diesem Bereich zu erweitern und die Etablierung von VR zu unterstützen.

7 Summary

Based on the available data, it can be concluded that the software has achieved its goal of presenting a virtual environment which doesn't trigger unwanted symptoms of simulator sickness on its own. It offers an easily adaptable platform for testing artificial movement in virtual reality (VR) and can be used and further adapted for further comparative tests in the future. Being developed in an engine that is widely used in VR development, it should be easy for other researchers to use the software as a basis for testing experimental movement methods in VR and adapt it to their needs.

The data obtained in the study can also be used to derive findings that could help developers in the future to develop VR software better tolerated by users. The findings of this study could also help users who want to use VR in a way that is as well tolerated as possible. For example, natural walking proved to be the most tolerable form of movement among the methods tested. To minimize the likelihood of simulator sickness occurring, an attempt should therefore be made to provide the most appropriate space possible so that the use of artificial movement methods can be reduced to a minimum. In cases where this is not possible, *teleportation* seems to be a well-tolerated form of artificial movement for many users.

Based on the data obtained, however, *floating movement* is associated with a significant increase in symptoms of simulator sickness. Since the basic trainability of kinetosis has been extensively documented in literature, it would also be conceivable to use the proposed software as a training tool for simulator sickness in VR.

It should also be mentioned that the field of virtual reality – like many technical areas – is subject to constant further development. Since the study was conducted, newer headsets have been released, which offer advancements in terms of their resolution, refresh rate and optics, among other factors. The results presented must therefore be understood as a snapshot. However, as the work primarily focused on comparing the methods of artificial movement against each other, it can be assumed that the data collected is largely independent of the technical platform.

Overall, it is the author's opinion that the software developed, and the results of the study conducted, contribute to a better understanding of simulator sickness in VR environments

and enable future structured research. This may help to expand research in this area and help VR reach a broader establishment.

8 Literaturverzeichnis

- [1] S. Gupta, A. Mahmoud, and M. R. Massoomi, “A Clinician’s Guide to Smartwatch ‘Interrogation,’” *Curr. Cardiol. Rep.*, vol. 24, no. 8, pp. 995–1009, Aug. 2022, doi: 10.1007/S11886-022-01718-0.
- [2] A. L. G. Morrell *et al.*, “The history of robotic surgery and its evolution: when illusion becomes reality,” *Rev. Col. Bras. Cir.*, vol. 48, p. e20202798, 2021, doi: 10.1590/0100-6991E-20202798.
- [3] G. Mahara, C. Tian, X. Xu, and W. Wang, “Revolutionising health care: Exploring the latest advances in medical sciences,” *J. Glob. Health*, vol. 13, p. 03042, 2023, doi: 10.7189/JOGH.13.03042.
- [4] A. G. Ekeland, A. Bowes, and S. Flottorp, “Effectiveness of telemedicine: A systematic review of reviews,” *Int. J. Med. Inform.*, vol. 79, no. 11, pp. 736–771, Nov. 2010, doi: 10.1016/J.IJMEDINF.2010.08.006.
- [5] F. Richter, “AR & VR Adoption Is Still in Its Infancy,” <https://www.statista.com/chart/28467/virtual-and-augmented-reality-adoption-forecast/>, 2023. <https://www.statista.com/chart/28467/virtual-and-augmented-reality-adoption-forecast/> (accessed Dec. 29, 2023).
- [6] C. Mims, “Whatever Happened to ... Virtual Reality? | MIT Technology Review,” 2010. <https://www.technologyreview.com/2010/10/22/89974/whatever-happened-to-virtual-reality/> (accessed Mar. 10, 2023).
- [7] P. Cipresso, I. A. C. Giglioli, M. A. Raya, and G. Riva, “The past, present, and future of virtual and augmented reality research: A network and cluster analysis of the literature,” *Front. Psychol.*, vol. 9, no. NOV, p. 2086, Nov. 2018, doi: 10.3389/FPSYG.2018.02086/BIBTEX.
- [8] M. I. Berkman, “History of Virtual Reality,” *Encycl. Comput. Graph. Games*, pp. 1–9, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-08234-9_169-1.
- [9] T. Mazuryk and M. Gervautz, “Virtual Reality History, Applications, Technology and Future,” pp. 1013–1018, 1999, Accessed: Feb. 10, 2023. [Online]. Available: <http://www.cg.tuwien.ac.at/>
- [10] P. Dempsey, “The Teardown: HTC Vive virtual reality headset,” *Eng. Technol.*,

- vol. 11, no. 7, pp. 80–81, Aug. 2016, doi: 10.1049/ET.2016.0731.
- [11] A. Borrego, J. Latorre, M. Alcañiz, and R. Llorens, “Comparison of Oculus Rift and HTC Vive: Feasibility for Virtual Reality-Based Exploration, Navigation, Exergaming, and Rehabilitation,” *Games Health J.*, vol. 7, no. 3, pp. 151–156, Jun. 2018, doi: 10.1089/g4h.2017.0114.
 - [12] “CES2016_HTCVive_Pre_Winters | HTC’s new Vive Pre virtual rea... | Flickr.” <https://www.flickr.com/photos/92587836@N04/24177102722/> (accessed Nov. 27, 2024).
 - [13] E. Lockett, “A Quantitative Evaluation of the HTC Vive for Virtual Reality Research,” *Dep. Comput. Inf. Sci.*, no. May, pp. 15–20, 2018, Accessed: Dec. 16, 2022. [Online]. Available: https://egrove.olemiss.edu/hon_thesis/331
 - [14] F. Pires, C. Costa, and P. Dias, “On the Use of Virtual Reality for Medical Imaging Visualization,” *J. Digit. Imaging*, vol. 34, no. 4, p. 1034, Aug. 2021, doi: 10.1007/S10278-021-00480-Z.
 - [15] “Realize Medical – Plan better surgeries in virtual reality.” <https://www.realizemed.com/> (accessed Nov. 25, 2024).
 - [16] “Virtual Reality in Medicine: New Opportunities for Diagnostics and Surgical Planning | University of Basel.” <https://www.unibas.ch/en/News-Events/News/Uni-Research/Virtual-Reality-in-Medicine.html> (accessed Nov. 25, 2024).
 - [17] J. T. Verhey, J. M. Haglin, E. M. Verhey, and D. E. Hartigan, “Virtual, augmented, and mixed reality applications in orthopedic surgery,” *Int. J. Med. Robot.*, vol. 16, no. 2, Apr. 2020, doi: 10.1002/RCS.2067.
 - [18] C. Boedecker *et al.*, “Using virtual 3D-models in surgical planning: workflow of an immersive virtual reality application in liver surgery,” *Langenbeck’s Arch. Surg.*, vol. 406, no. 3, pp. 911–915, May 2021, doi: 10.1007/S00423-021-02127-7/FIGURES/2.
 - [19] H. Ghaednia *et al.*, “Augmented and virtual reality in spine surgery, current applications and future potentials,” *Spine J.*, vol. 21, no. 10, pp. 1617–1625, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.spinee.2021.03.018.

- [20] R. Mishra, K. Narayanan, G. E. Umana, N. Montemurro, B. Chaurasia, and H. Deora, “Virtual Reality in Neurosurgery: Beyond Neurosurgical Planning,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 3, Feb. 2022, doi: 10.3390/IJERPH19031719.
- [21] E. Hofstetter, “Bahnbrechende Kardio-Bildgebung • healthcare-in-europe.com,” 2018. <https://healthcare-in-europe.com/de/news/bahnbrechende-kardio-bildgebung.html> (accessed Nov. 25, 2024).
- [22] J. Hinze *et al.*, “Spider Phobia: Neural Networks Informing Diagnosis and (Virtual/Augmented Reality-Based) Cognitive Behavioral Psychotherapy-A Narrative Review,” *Front. psychiatry*, vol. 12, Aug. 2021, doi: 10.3389/FPSYT.2021.704174.
- [23] P. Lindner, A. Miloff, C. Bergman, G. Andersson, W. Hamilton, and P. Carlbring, “Gamified, Automated Virtual Reality Exposure Therapy for Fear of Spiders: A Single-Subject Trial Under Simulated Real-World Conditions,” *Front. psychiatry*, vol. 11, Mar. 2020, doi: 10.3389/FPSYT.2020.00116.
- [24] M. J. Park, D. J. Kim, U. Lee, E. J. Na, and H. J. Jeon, “A Literature Overview of Virtual Reality (VR) in Treatment of Psychiatric Disorders: Recent Advances and Limitations,” *Front. psychiatry*, vol. 10, pp. 1–9, Jul. 2019, doi: 10.3389/FPSYT.2019.00505.
- [25] E. Rimer, L. V. Husby, and S. Solem, “Virtual Reality Exposure Therapy for Fear of Heights: Clinicians’ Attitudes Become More Positive After Trying VRET,” *Front. Psychol.*, vol. 12, Jul. 2021, doi: 10.3389/FPSYG.2021.671871.
- [26] E. Salehi, M. Mehrabi, F. Fatehi, and A. Salehi, “Virtual Reality Therapy for Social Phobia: A Scoping Review,” *Stud. Health Technol. Inform.*, vol. 270, pp. 713–717, Jun. 2020, doi: 10.3233/SHTI200253.
- [27] A. Voinescu, J. Sui, and D. Stanton Fraser, “Virtual reality in neurorehabilitation: An umbrella review of meta-analyses,” *J. Clin. Med.*, vol. 10, no. 7, p. 1478, Apr. 2021, doi: 10.3390/JCM10071478/S1.
- [28] V. C. Tashjian *et al.*, “Virtual reality for management of pain in hospitalized patients: Results of a controlled trial,” *JMIR Ment. Heal.*, vol. 4, no. 1, Jan. 2017, doi: 10.2196/mental.7387.

- [29] N. Kim, Y. Park, and B. H. Lee, “Effects of community-based virtual reality treadmill training on balance ability in patients with chronic stroke,” *J. Phys. Ther. Sci.*, vol. 27, no. 3, pp. 655–658, 2015, doi: 10.1589/jpts.27.655.
- [30] M. de Clerk, M. Dangelmaier, G. Schmierer, and D. Spath, “User Centered Design of Interaction Techniques for VR-Based Automotive Design Reviews,” *Front. Robot. AI*, vol. 6, no. MAR, 2019, doi: 10.3389/FROBT.2019.00013.
- [31] G. Lawson, D. Salanitri, and B. Waterfield, “Future directions for the development of virtual reality within an automotive manufacturer,” *Appl. Ergon.*, vol. 53 Pt B, pp. 323–330, Mar. 2016, doi: 10.1016/J.APERGO.2015.06.024.
- [32] L. Gong *et al.*, “Interaction design for multi-user virtual reality systems: An automotive case study,” *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 1259–1264, 2020, doi: 10.1016/J.PROCIR.2020.04.036.
- [33] E. Ashgan, N. Moubarki, M. Saif, and A. M. El-Shorbagy, “Virtual Reality in Architecture,” *Civ. Eng. Archit.*, vol. 11, no. 1, pp. 498–506, Jan. 2023, doi: 10.13189/CEA.2023.110138.
- [34] M. Ghobadi and S. M.E. Sepasgozar, “An Investigation of Virtual Reality Technology Adoption in the Construction Industry,” *Smart Cities Constr. Technol.*, May 2020, doi: 10.5772/INTECHOPEN.91351.
- [35] N. Randewich and T. Datta, “Apple’s market value ends above \$3 trillion for first time | Reuters,” *reuters.com*, 2023. <https://www.reuters.com/technology/apples-market-value-breaches-3-trillion-mark-again-2023-06-30/> (accessed Aug. 30, 2023).
- [36] Statista, “Biggest companies in the world by market cap 2021 | Statista,” *Statista*, 2023. <https://www.statista.com/statistics/263264/top-companies-in-the-world-by-market-capitalization/> (accessed Aug. 21, 2023).
- [37] Apple, “Apple Vision Pro - Apple,” *apple.com*, 2023. <https://www.apple.com/apple-vision-pro/> (accessed Aug. 30, 2023).
- [38] R. (Forbes) Nieva and K. (Forbes) Cai, “Apple Unveils Vision Pro AR/VR Headset, Its First Major New Product In Nearly A Decade,” *Forbes.com*, 2023. Accessed: Aug. 24, 2023. [Online]. Available: <https://www.forbes.com/sites/richardnieva/2023/06/05/apple-unveils-vision->

pro/?sh=18ac5f1a11de

- [39] N. Duzmanska, P. Strojny, and A. Strojny, “Can simulator sickness be avoided? A review on temporal aspects of simulator sickness,” *Front. Psychol.*, vol. 9, no. NOV, Nov. 2018, doi: 10.3389/FPSYG.2018.02132/FPSYG_09_02132_PDF.PDF.
- [40] J. J. LaViola, “A discussion of cybersickness in virtual environments,” *ACM SIGCHI Bull.*, vol. 32, no. 1, pp. 47–56, Jan. 2000, doi: 10.1145/333329.333344.
- [41] C. G. Christou and P. Aristidou, “Steering versus teleport locomotion for head mounted displays,” *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 10325 LNCS, pp. 431–446, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-60928-7_37/FIGURES/6.
- [42] D. Saredakis, A. Szpak, B. Birckhead, H. A. D. Keage, A. Rizzo, and T. Loetscher, “Factors Associated With Virtual Reality Sickness in Head-Mounted Displays: A Systematic Review and Meta-Analysis,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 0, p. 96, 2020, doi: 10.3389/FNHUM.2020.00096.
- [43] A. Koch, I. Cascorbi, M. Westhofen, M. Dafotakis, S. Klapa, and J. P. Kuhtz-Buschbeck, “See-und Reisekrankheit: Therapeutische Strategien und neurophysiologische Aspekte der Kinetosen,” *Dtsch. Arztebl. Int.*, vol. 115, no. 41, pp. 687–696, Oct. 2018, doi: 10.3238/arztebl.2018.0687.
- [44] “Motion sickness - Symptoms, diagnosis and treatment | BMJ Best Practice.” <https://bestpractice.bmj.com/topics/en-gb/1034> (accessed Dec. 19, 2024).
- [45] B. Cohen, C. Cho, M. Schubert, D. Huppert, J. Benson, and T. Brandt, “A Historical View of Motion Sickness—A Plague at Sea and on Land, Also with Military Impact,” *Front. Neurol.*, vol. 8, no. APR, p. 114, Apr. 2017, doi: 10.3389/FNEUR.2017.00114.
- [46] G. Bertolini and D. Straumann, “Moving in a moving world: A review on vestibular motion sickness,” *Frontiers in Neurology*, vol. 7, no. FEB. Frontiers Media S.A., p. 14, Feb. 15, 2016. doi: 10.3389/fneur.2016.00014.
- [47] J. R. Lackner, “Motion sickness: More than nausea and vomiting,” *Exp. Brain Res.*, vol. 232, no. 8, pp. 2493–2510, 2014, doi: 10.1007/S00221-014-4008-8.

- [48] N. Takeda, M. Morita, A. Horii, S. Nishiike, T. Kitahara, and A. Uno, “Neural mechanisms of motion sickness,” *Journal of Medical Investigation*, vol. 48, no. 1–2, pp. 44–59, 2001. Accessed: Dec. 17, 2024. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11286016/>
- [49] J. T. Reason, “Motion sickness adaptation: A neural mismatch model,” *J. R. Soc. Med.*, vol. 71, no. 11, pp. 819–829, 1978, doi: 10.1177/014107687807101109.
- [50] T. Wolffgram, *Maritime Medizin*. Springer Berlin Heidelberg, 2015, pp. 182–196. doi: 10.1007/978-3-642-55438-4.
- [51] R. S. Kennedy, J. M. Drexler, D. E. Compton, K. M. Stanney, D. Susan Lanham, and D. L. Harm, “Configural Scoring of Simulator Sickness, Cybersickness and Space Adaptation Syndrome: Similarities and Differences?”.
- [52] J. F. Golding, “Motion sickness susceptibility,” *Auton. Neurosci. Basic Clin.*, vol. 129, no. 1–2, pp. 67–76, 2006, doi: 10.1016/j.autneu.2006.07.019.
- [53] A. Neukum and H. Grattenthaler, “Kinetose in der Fahrsimulation,” *Kinetose der Fahrsimulation (Projekt Simul. von Einsatzfahrten im Auftrag des Präsidiums der Bayer. Bereitschaftspolizei, Abschlussbericht – Tl. II).*, p. 98, 2006, [Online]. Available: <http://www.psychologie.uni-wuerzburg.de/methoden>
- [54] C. Curry, R. Li, N. Peterson, and T. A. Stoffregen, “Cybersickness in Virtual Reality Head-Mounted Displays: Examining the Influence of Sex Differences and Vehicle Control,” *Int. J. Hum. Comput. Interact.*, vol. 36, no. 12, pp. 1161–1167, Jul. 2020, doi: 10.1080/10447318.2020.1726108.
- [55] A. M. Gavgani, F. R. Walker, D. M. Hodgson, and E. Nalivaiko, “A comparative study of cybersickness during exposure to virtual reality and ‘classic’ motion sickness: Are they different?,” *J. Appl. Physiol.*, vol. 125, no. 6, pp. 1670–1680, Dec. 2018, doi: 10.1152/JAPPLPHYSIOL.00338.2018.
- [56] S. Vlahovic, M. Suznjevic, and L. Skorin-Kapov, “Subjective Assessment of Different Locomotion Techniques in Virtual Reality Environments,” *2018 10th Int. Conf. Qual. Multimed. Exp. QoMEX 2018*, pp. 2018–2020, 2018, doi: 10.1109/QoMEX.2018.8463433.
- [57] “SteamVR/Environments/Entity Guide - Valve Developer Community,” *Valve Developer Community*.

- https://developer.valvesoftware.com/wiki/SteamVR/Environments/Entity_Guide
(accessed Mar. 19, 2025).
- [58] D. C. Niehorster, L. Li, and M. Lappe, “The accuracy and precision of position and orientation tracking in the HTC vive virtual reality system for scientific research,” *Iperception.*, vol. 8, no. 3, pp. 1–23, Jun. 2017, doi: 10.1177/2041669517708205/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_2041669517708205-FIG1.JPEG.
- [59] E. Bozgeyikli, A. Raij, S. Katkoori, and R. Dubey, “Point & Teleport locomotion technique for virtual reality,” *CHI Play 2016 - Proc. 2016 Annu. Symp. Comput. Interact. Play*, pp. 205–216, 2016, doi: 10.1145/2967934.2968105.
- [60] E. D. Ragan, A. Wood, R. P. McMahan, and D. A. Bowman, “Trade-offs related to travel techniques and level of display fidelity in virtual data-analysis environments,” *JVRC12 Jt. Virtual Real. Conf. ICAT - EGVE - EuroVR 2012, Proc.*, pp. 81–84, 2012, doi: 10.2312/EGVE/JVRC12/081-084.
- [61] C. Boletsis, “The New Era of Virtual Reality Locomotion: A Systematic Literature Review of Techniques and a Proposed Typology,” *Multimodal Technol. Interact. 2017, Vol. 1, Page 24*, vol. 1, no. 4, p. 24, Sep. 2017, doi: 10.3390/MTI1040024.
- [62] C. Boletsis and J. E. Cedergren, “VR Locomotion in the New Era of Virtual Reality: An Empirical Comparison of Prevalent Techniques,” *Adv. Human-Computer Interact.*, vol. 2019, no. 1, p. 7420781, Jan. 2019, doi: 10.1155/2019/7420781.
- [63] P. Bimberg, T. Weissker, and A. Kulik, “On the Usage of the Simulator Sickness Questionnaire for Virtual Reality Research,” *Proc. - 2020 IEEE Conf. Virtual Real. 3D User Interfaces, VRW 2020*, pp. 464–467, 2020, doi: 10.1109/VRW50115.2020.00098.
- [64] E. M. Kolasinski, “Simulator Sickness in Virtual Environments,” *Tech. Rep. 1027; U.S. Army Res. Inst.*, pp. 2458–2458, 1995, doi: 10.1121/1.404501.
- [65] L. Rebenitsch and C. Owen, “Review on cybersickness in applications and visual displays,” *Virtual Real. 2016 202*, vol. 20, no. 2, pp. 101–125, Apr. 2016, doi: 10.1007/S10055-016-0285-9.
- [66] R. H. Y. So, W. T. Lo, and A. T. K. Ho, “Effects of navigation speed on motion

- sickness caused by an immersive virtual environment,” *Hum. Factors*, vol. 43, no. 3, pp. 452–461, 2001, doi: 10.1518/001872001775898223.
- [67] K. Stanney *et al.*, “Identifying Causes of and Solutions for Cybersickness in Immersive Technology: Reformulation of a Research and Development Agenda,” *Int. J. Hum. Comput. Interact.*, vol. 36, no. 19, pp. 1783–1803, Nov. 2020, doi: 10.1080/10447318.2020.1828535.
- [68] M. A. Gresty, J. F. Golding, H. Le, and K. Nightingale, “Cognitive impairment by spatial disorientation,” *Aviat. Space. Environ. Med.*, vol. 79, no. 2, pp. 105–111, Feb. 2008, doi: 10.3357/ASEM.2143.2008.
- [69] M. A. Gresty and J. F. Golding, “Impact of Vertigo and Spatial Disorientation on Concurrent Cognitive Tasks,” *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, vol. 1164, no. 1, pp. 263–267, May 2009, doi: 10.1111/J.1749-6632.2008.03744.X.
- [70] J. Dahlman, *Psychophysiological and performance aspects on motion sickness*, no. 1071. Linköping, 2009. Accessed: Dec. 21, 2024. [Online]. Available: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-15919%0Ahttps://trid.trb.org/view/901258>
- [71] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum, and M. G. Lilienthal, “Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness,” *Int. J. Aviat. Psychol.*, vol. 3, no. 3, pp. 203–220, 1993, doi: 10.1207/s15327108ijap0303_3.
- [72] M. Al Zayer, I. B. Adhanom, P. MacNeilage, and E. Folmer, “The effect of field-of-view restriction on sex bias in VR sickness and spatial navigation performance,” *Conf. Hum. Factors Comput. Syst. - Proc.*, May 2019, doi: 10.1145/3290605.3300584.
- [73] J. P. Stauffert, F. Niebling, and M. E. Latoschik, “Effects of Latency Jitter on Simulator Sickness in a Search Task,” in *25th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, VR 2018 - Proceedings*, Aug. 2018, pp. 121–127. doi: 10.1109/VR.2018.8446195.
- [74] E. Chang, H. T. Kim, and B. Yoo, “Virtual Reality Sickness: A Review of Causes and Measurements,” *Int. J. Hum. Comput. Interact.*, vol. 36, no. 17, pp. 1658–1682, 2020, doi: 10.1080/10447318.2020.1778351.

- [75] S. W. Jerdan, M. Grindle, H. C. Van Woerden, and M. N. Kamel Boulos, “Head-Mounted Virtual Reality and Mental Health: Critical Review of Current Research,” *JMIR Serious Games*, vol. 6, no. 3, Jul. 2018, doi: 10.2196/GAMES.9226.
- [76] H. K. Kim, J. Park, Y. Choi, and M. Choe, “Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment,” *Appl. Ergon.*, vol. 69, pp. 66–73, 2018, doi: 10.1016/j.apergo.2017.12.016.
- [77] S. D. Young, B. D. Adelstein, and S. R. Ellis, “Demand characteristics of a questionnaire used to assess motion sickness in a virtual environment,” *Proc. - IEEE Virtual Real.*, vol. 2006, pp. 97–102, 2006, doi: 10.1109/VR.2006.44.
- [78] T. Hirzle, M. Cordts, and E. Rukzio, “A critical assessment of the use of ssq as a measure of general discomfort in vr head-mounted displays,” May 2021. doi: 10.1145/3411764.3445361.
- [79] A. Basu, “A brief chronology of Virtual Reality,” Nov. 2019, Accessed: Nov. 27, 2024. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1911.09605v2>
- [80] “History Of Virtual Reality - Virtual Reality Society.” <https://www.vrs.org.uk/virtual-reality/history.html> (accessed Mar. 08, 2023).
- [81] iFixit, “HTC Vive Teardown - iFixit,” <https://de.ifixit.com/Teardown/HTC+Vive+Teardown/62213>, 2016. <https://de.ifixit.com/Teardown/HTC+Vive+Teardown/62213?lang=en> (accessed Oct. 07, 2024).
- [82] R. Janzik, “Virtual Reality,” *Medien. und virtuelle Realität*, pp. 11–74, 2022, doi: 10.1007/978-3-658-37224-8_2.
- [83] I. E. Sutherland, “HEAD-MOUNTED THREE DIMENSIONAL DISPLAY,” 1968, vol. 33, no. pt 1, pp. 757–764. doi: 10.1145/1476589.1476686.
- [84] I. Sutherland, “The Ultimate Display,” 1965. Accessed: Mar. 10, 2023. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1601.03459>
- [85] F. Steinicke, “Being really virtual: Immersive natives and the future of virtual reality,” *Being Really Virtual Immersive Nativ. Futur. Virtual Real.*, pp. 1–166, Jan. 2016, doi: 10.1007/978-3-319-43078-2.
- [86] S. G. Weinbaum, *Pygmalion’s Spectacles*. 1935.

- [87] N. C. Burbules, “Rethinking the Virtual,” *E-Learning Digit. Media*, vol. 1, no. 2, pp. 162–183, Jun. 2004, doi: 10.2304/ELEA.2004.1.2.2.
- [88] “Virtual reality - Entertainment, Immersion, Simulation | Britannica.” <https://www.britannica.com/technology/virtual-reality/Entertainment#ref884340> (accessed Nov. 27, 2024).
- [89] E. Amos, “Virtual-Boy-Set,” *public domain*, 2011. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Virtual-Boy-Set.png> (accessed Oct. 06, 2024).
- [90] “Deep Dive: PC Distribution Platforms.” <https://www.konvoy.vc/content/deep-dive-pc-distribution-platforms> (accessed Nov. 27, 2024).
- [91] “Steam-Hard- & Softwareumfrage.” <https://store.steampowered.com/hwsurvey> (accessed Nov. 27, 2024).
- [92] “Game developers revenue from video game stores 2021 | Statista.” <https://www.statista.com/statistics/1236112/game-developers-revenue-video-game-stores/> (accessed Nov. 27, 2024).
- [93] “Valve Lines Up Console Partners in Challenge to Microsoft, Sony - Bloomberg.” <https://www.bloomberg.com/news/articles/2013-11-04/valve-lines-up-console-partners-in-challenge-to-microsoft-sony> (accessed Jan. 27, 2025).
- [94] “Valve issues scathing reply over the facts behind a Steam antitrust case - Ars Technica.” <https://arstechnica.com/gaming/2021/07/valve-issues-scathing-reply-over-the-facts-behind-a-steam-antitrust-case/> (accessed Jan. 27, 2025).
- [95] “Steamworks Development – Steam: Das Jahr 2021 im Rückblick: Steam-News.” <https://store.steampowered.com/news/group/4145017/view/3133946090937137590> (accessed Jan. 27, 2025).
- [96] “With \$4.3 billion in sales, 2017 was Steam’s biggest year yet.” <https://www.pcgamesn.com/steam-revenue-2017> (accessed Jan. 27, 2025).
- [97] B. Lang, “Monthly-connected VR Headsets on Steam Near 3 Million Milestone,” *roadtovr.com*, Apr. 02, 2021. <https://www.roadtovr.com/monthly-connected-headsets-steam-3-million-march-2021/> (accessed Dec. 29, 2023).
- [98] K. Srivastava, R. Das, and S. Chaudhury, “Virtual reality applications in mental

- health: Challenges and perspectives,” *Ind. Psychiatry J.*, vol. 23, no. 2, p. 83, 2014, doi: 10.4103/0972-6748.151666.
- [99] D. Freeman *et al.*, “Virtual reality in the assessment, understanding, and treatment of mental health disorders,” *Psychol. Med.*, vol. 47, no. 14, pp. 2393–2400, Oct. 2017, doi: 10.1017/S003329171700040X.
- [100] J. Diemer, N. Lohkamp, A. Mühlberger, and P. Zwanzger, “Fear and physiological arousal during a virtual height challenge-effects in patients with acrophobia and healthy controls,” *J. Anxiety Disord.*, vol. 37, pp. 30–39, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.JANXDIS.2015.10.007.
- [101] C. J. Falconer *et al.*, “Embodying self-compassion within virtual reality and its effects on patients with depression,” *BJPsych Open*, vol. 2, no. 1, pp. 74–80, Jan. 2016, doi: 10.1192/BJPO.BP.115.002147.
- [102] M. N. Kamel Boulos, Z. Lu, P. Guerrero, C. Jennett, and A. Steed, “From urban planning and emergency training to Pokémon Go: Applications of virtual reality GIS (VRGIS) and augmented reality GIS (ARGIS) in personal, public and environmental health,” *Int. J. Health Geogr.*, vol. 16, no. 1, Feb. 2017, doi: 10.1186/S12942-017-0081-0.
- [103] M. Slater and M. V. Sanchez-Vives, “Enhancing our lives with immersive virtual reality,” *Front. Robot. AI*, vol. 3, no. DEC, Dec. 2016, doi: 10.3389/FROBT.2016.00074.
- [104] E. Amos, “Oculus-Rift-CV1-Headset-Back.jpg,” *public domain*, 2017. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oculus-Rift-CV1-Headset-Back.jpg> (accessed Nov. 27, 2024).
- [105] E. Amos, “Oculus-Rift-CV1-Headset-Front.jpg,” *public domain*, 2017. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Oculus-Rift-CV1-Headset-Front.jpg> (accessed Oct. 14, 2024).
- [106] H. Norrie, “A Comparative Evaluation of Walking Methods for Reducing Simulator Sickness for a High-Fidelity Archery Virtual Reality Simulation Exploring the use of haptic feedback to reduce simulator sickness in virtual reality,” 2017.
- [107] M. P. Jacob Habgood, D. Moore, D. Wilson, and S. Alapont, “Rapid, Continuous

- Movement between Nodes as an Accessible Virtual Reality Locomotion Technique,” *25th IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces, VR 2018 - Proceedings*. pp. 371–378, 2018. doi: 10.1109/VR.2018.8446130.
- [108] J. Frommel, S. Sonntag, and M. Weber, “Effects of controller-based locomotion on player experience in a virtual reality exploration game,” *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, vol. Part F1301, 2017, doi: 10.1145/3102071.3102082.
- [109] J. Clifton and S. Palmisano, “Effects of steering locomotion and teleporting on cybersickness and presence in HMD-based virtual reality,” *Virtual Real.*, vol. 24, no. 3, pp. 453–468, 2020, doi: 10.1007/s10055-019-00407-8.
- [110] “VR bietet mehr als ‚hübsche‘ Radiologie-Aufnahmen • healthcare-in-europe.com.” <https://healthcare-in-europe.com/de/news/vr-bietet-mehr-als-huebsche-radiologie-aufnahmen.html> (accessed Nov. 25, 2024).
- [111] R. A. Kockro *et al.*, “Aneurysm Surgery with Preoperative Three-Dimensional Planning in a Virtual Reality Environment: Technique and Outcome Analysis,” *World Neurosurg.*, vol. 96, pp. 489–499, Dec. 2016, doi: 10.1016/J.WNEU.2016.08.124.
- [112] S. Chen, K. Zhang, X. Jia, M. Qiang, and Y. Chen, “Evaluation of the computer-assisted virtual surgical technology in preoperative planning for distal femoral fracture,” *Injury*, vol. 51, no. 2, pp. 443–451, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.injury.2019.10.085.
- [113] N. M. B. Laskay, J. A. George, L. Knowlin, T. P. Chang, J. M. Johnston, and J. Godzik, “Optimizing Surgical Performance Using Preoperative Virtual Reality Planning: A Systematic Review,” *World J. Surg.*, vol. 47, no. 10, pp. 2367–2377, Oct. 2023, doi: 10.1007/S00268-023-07064-8.
- [114] N. E. Seymour *et al.*, “Virtual reality training improves operating room performance: results of a randomized, double-blinded study,” *Ann. Surg.*, vol. 236, no. 4, pp. 458–464, Oct. 2002, doi: 10.1097/00000658-200210000-00008.
- [115] K. Abhari *et al.*, “Training for planning tumour resection: augmented reality and human factors,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 62, no. 6, pp. 1466–1477, Jun. 2015, doi: 10.1109/TBME.2014.2385874.
- [116] S. Chan, F. Conti, K. Salisbury, and N. H. Blevins, “Virtual reality simulation in

- neurosurgery: technologies and evolution,” *Neurosurgery*, vol. 72 Suppl 1, no. SUPPL. 1, Jan. 2013, doi: 10.1227/NEU.0B013E3182750D26.
- [117] J. Gasco *et al.*, “Virtual reality spine surgery simulation: an empirical study of its usefulness,” *Neurol. Res.*, vol. 36, no. 11, pp. 968–973, Nov. 2014, doi: 10.1179/1743132814Y.00000000388.
- [118] S. J. Lowater, J. Grauslund, and A. S. Vergmann, “Modern Educational Simulation-Based Tools Among Residents of Ophthalmology: A Narrative Review,” *Ophthalmol. Ther.*, vol. 11, no. 6, pp. 1961–1974, Dec. 2022, doi: 10.1007/S40123-022-00559-Y.
- [119] T. P. Grantcharov, V. B. Kristiansen, J. Bendix, L. Bardram, J. Rosenberg, and P. Funch-Jensen, “Randomized clinical trial of virtual reality simulation for laparoscopic skills training,” *Br. J. Surg.*, vol. 91, no. 2, pp. 146–150, Feb. 2004, doi: 10.1002/bjs.4407.
- [120] A. Pourmand, S. Davis, A. Marchak, T. Whiteside, and N. Sikka, “Virtual Reality as a Clinical Tool for Pain Management,” *Curr. Pain Headache Rep.*, vol. 22, no. 8, pp. 1–6, Aug. 2018, doi: 10.1007/S11916-018-0708-2/METRICS.
- [121] E. Bani Mohammad and M. Ahmad, “Virtual reality as a distraction technique for pain and anxiety among patients with breast cancer: A randomized control trial,” *Palliat. Support. Care*, vol. 17, no. 1, pp. 29–34, Feb. 2019, doi: 10.1017/S1478951518000639.
- [122] M. R. Walker, G. J. S. Kallungal, J. E. Musser, R. Folen, M. C. Stetz, and J. Y. Clark, “Treatment Efficacy of Virtual Reality Distraction in the Reduction of Pain and Anxiety During Cystoscopy,” *Mil. Med.*, vol. 179, no. 8, pp. 891–896, Aug. 2014, doi: 10.7205/MILMED-D-13-00343.
- [123] J. H. Kim, S. H. Jang, C. S. Kim, J. H. Jung, and J. H. You, “Use of virtual reality to enhance balance and ambulation in chronic stroke: A double-blind, randomized controlled study,” *Am. J. Phys. Med. Rehabil.*, vol. 88, no. 9, pp. 693–701, 2016, doi: 10.1097/PHM.0b013e3181b33350.
- [124] R. Lloréns, J. A. Gil-Gómez, M. Alcañiz, C. Colomer, and E. Noé, “Improvement in balance using a virtual reality-based stepping exercise: A randomized controlled trial involving individuals with chronic stroke,” *Clin. Rehabil.*, vol. 29, no. 3, pp.

- 261–268, 2015, doi: 10.1177/0269215514543333.
- [125] D. Montoya *et al.*, “Biomechanical Assessment of Post-Stroke Patients’ Upper Limb before and after Rehabilitation Therapy Based on FES and VR,” *Sensors (Basel)*, vol. 22, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/S22072693.
- [126] T. B. Wray, J. J. Kemp, and M. A. Larsen, “Virtual reality (VR) treatments for anxiety disorders are unambiguously successful, so why are so few therapists using it? Barriers to adoption and potential solutions,” *Cogn. Behav. Ther.*, vol. 52, no. 6, p. 603, 2023, doi: 10.1080/16506073.2023.2229017.
- [127] F. P. Binder, D. Pöhlchen, P. Zwanzger, and V. I. Spoormaker, “Facing Your Fear in Immersive Virtual Reality: Avoidance Behavior in Specific Phobia,” *Front. Behav. Neurosci.*, vol. 16, Apr. 2022, doi: 10.3389/FNBEH.2022.827673.
- [128] J. T. . Reason and J. J. . Brand, *Motion sickness*. Oxford, England: Academic Press, 1975. Accessed: Oct. 17, 2024. [Online]. Available: https://books.google.com/books/about/Motion_Sickness.html?hl=de&id=JMxRAAAAMAAJ
- [129] A. Zwergal, D. Grabova, and F. Schöberl, “Vestibular contribution to spatial orientation and navigation,” *Curr. Opin. Neurol.*, vol. 37, no. 1, pp. 52–58, Feb. 2024, doi: 10.1097/WCO.0000000000001230.
- [130] K. E. Cullen, “The vestibular system: multimodal integration and encoding of self-motion for motor control,” *Trends Neurosci.*, vol. 35, no. 3, p. 185, Mar. 2012, doi: 10.1016/J.TINS.2011.12.001.
- [131] T. Brandt, “Motion Sickness,” in *Vertigo: Its Multisensory Syndromes*, Springer, London, 1991, pp. 311–323. doi: 10.1007/978-1-4471-3342-1_25.
- [132] F. Schmäl, “Neuronal Mechanisms and the Treatment of Motion Sickness,” *Pharmacology*, vol. 91, no. 3–4, pp. 229–241, May 2013, doi: 10.1159/000350185.
- [133] B. Keshavarz and J. F. Golding, *Motion sickness: current concepts and management*, vol. 35, no. 1. Lippincott Williams and Wilkins, 2022, pp. 107–112. doi: 10.1097/WCO.0000000000001018.
- [134] P. Kourtesis, S. Collina, L. A. A. Dumas, and S. E. MacPherson, “Technological Competence Is a Pre-condition for Effective Implementation of Virtual Reality

- Head Mounted Displays in Human Neuroscience: A Technological Review and Meta-Analysis,” *Front. Hum. Neurosci.*, vol. 0, p. 342, Oct. 2019, doi: 10.3389/FNHUM.2019.00342.
- [135] M. Gallagher and E. R. Ferrè, “Cybersickness: A Multisensory Integration Perspective,” *Multisens. Res.*, vol. 31, no. 7, pp. 645–674, 2018, doi: 10.1163/22134808-20181293.
- [136] Y. Nam, U. Hong, H. Chung, and S. R. Noh, “Eye Movement Patterns Reflecting Cybersickness: Evidence from Different Experience Modes of a Virtual Reality Game,” *Cyberpsychology, Behav. Soc. Netw.*, vol. 25, no. 2, pp. 135–139, Feb. 2022, doi: 10.1089/cyber.2021.0167.
- [137] M. A. Mehlitz, “Aufbau eines medizinischen Virtual-Reality-Labors und Entwicklung eines VR-gestützten neuropsychologischen Testsystems mit einer präklinischen und klinischen Evaluationsstudie,” *Medizinische Fak. der Univ. Göttingen*, p. 137, 2004.
- [138] T. M. Porcino, E. Clua, D. Trevisan, C. N. Vasconcelos, and L. Valente, “Minimizing cyber sickness in head mounted display systems: Design guidelines and applications,” 2017. doi: 10.1109/SeGAH.2017.7939283.
- [139] R. von Baumgarten and M. Reiser, “Kinetosen-Ursachen, Symptomatik, Therapie,” *Verh. Dtsch. Ges. Inn. Med.*, vol. 95, pp. 593–597, 1989, doi: 10.1007/978-3-642-83864-4_111.
- [140] M. E. McCauley and T. J. Sharkey, “Cybersickness: Perception of Self-Motion in Virtual Environments,” *Presence Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 1, no. 3, pp. 311–318, Jan. 1992, doi: 10.1162/PRES.1992.1.3.311.
- [141] G. R. Morrow, “The effect of a susceptibility to motion sickness on the side effects of cancer chemotherapy,” *Cancer*, vol. 55, no. 12, pp. 2766–2770, 1985, doi: 10.1002/1097-0142(19850615)55:12<2766::AID-CNCR2820551207>3.0.CO;2-7.
- [142] K. E. Money and B. S. Cheung, “Another function of the inner ear: Facilitation of the emetic response to poisons,” *Aviat. Sp. Environ. Med.*, vol. 54, no. 3, pp. 208–211, 1983, Accessed: Dec. 23, 2024. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6847555/>

- [143] C. M. Reavley, J. F. Golding, L. F. Cherkas, T. D. Spector, and A. J. MacGregor, “Genetic influences on motion sickness susceptibility in adult women: A classical twin study,” *Aviat. Sp. Environ. Med.*, vol. 77, no. 11, pp. 1148–1152, 2006.
- [144] A. (University of H. Shupak and C. R.)Gordon, “Motion sickness: Advances in pathogenesis, prediction, prevention, and treatment,” *Aviat. Sp. Environ. Med.*, vol. 77, pp. 1213–1223, Dec. 2006.
- [145] K. Stanney, C. Fidopiastis, and L. Foster, “Virtual Reality Is Sexist: But It Does Not Have to Be,” *Front. Robot. AI*, vol. 7, Jan. 2020, doi: 10.3389/frobt.2020.00004.
- [146] A. Kuritzky, D. K. Ziegler, and R. Hassanein, “Vertigo, Motion Sickness and Migraine,” *Headache J. Head Face Pain*, vol. 21, no. 5, pp. 227–231, 1981, doi: 10.1111/j.1526-4610.1981.hed2105227.x.
- [147] S. H. Jeong, S. Y. Oh, H. J. Kim, J. W. Koo, and J. S. Kim, “Vestibular dysfunction in migraine: Effects of associated vertigo and motion sickness,” *J. Neurol.*, vol. 257, no. 6, pp. 905–912, 2010, doi: 10.1007/s00415-009-5435-5.
- [148] L. Murdin *et al.*, “Motion sickness in migraine and vestibular disorders,” *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatry*, vol. 86, no. 5, pp. 585–587, 2015, doi: 10.1136/jnnp-2014-308331.
- [149] M. Porst *et al.*, “Migräne und Spannungskopfschmerz in Deutschland. Prävalenz und Erkrankungsschwere im Rahmen der Krankheitslast-Studie BURDEN 2020,” 2020. doi: 10.25646/6988.
- [150] R. Anken, M. Knie, and R. Hilbig, “Inner Ear Otolith Asymmetry in Late-Larval Cichlid Fish (*Oreochromis mossambicus*, Perciformes) Showing Kinetotic Behaviour Under Diminished Gravity,” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, Dec. 2017, doi: 10.1038/S41598-017-15927-Z.
- [151] M. Cai *et al.*, “Association of Lymphatic Fluid Volume in the Inner Ear of Beagle Dogs with the Susceptibility to Motion Sickness,” *J. Int. Adv. Otol.*, vol. 18, no. 4, pp. 340–346, Jul. 2022, doi: 10.5152/IAO.2022.21584.
- [152] K. Helling, S. Hausmann, A. Clarke, and H. Scherer, “Experimentally induced motion sickness in fish: possible role of the otolith organs,” *Acta Otolaryngol.*, vol. 123, no. 4, pp. 488–492, 2003, doi: 10.1080/0036554021000028121.

- [153] N. Klocker, W. Hanschke, S. Toussaint, and T. Verse, “No Title,” *Eur. J. Pharm. Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 227–232, May 2001, doi: 10.1016/S0928-0987(01)00107-5.
- [154] R. S. Kennedy and A. Graybiel, “THE DIAL TEST: A STANDARDIZED PROCEDURE FOR THE EXPERIMENTAL PRODUCTION OF CANAL SICKNESS SYMPTOMATOLOGY,” Pensacola, Jun. 1965.
- [155] K. M. Stanney, R. S. Kennedy, and J. M. Drexler, “Cybersickness is not simulator sickness,” in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, Oct. 1997, vol. 2, pp. 1138–1141. doi: 10.1177/107118139704100292.
- [156] A. S. Fernandes and S. K. Feiner, “Combating VR sickness through subtle dynamic field-of-view modification,” *2016 IEEE Symp. 3D User Interfaces, 3DUI 2016 - Proc.*, pp. 201–210, 2016, doi: 10.1109/3DUI.2016.7460053.
- [157] L. L. Arns and M. M. Cerney, “The relationship between age and incidence of cybersickness among immersive environment users,” *Proc. - IEEE Virtual Real.*, vol. 2005, pp. 267–268, 2005, doi: 10.1109/vr.2005.80.
- [158] S. V. G. Cobb, “Measurement of postural stability before and after immersion in a virtual environment,” *Appl. Ergon.*, vol. 30, no. 1, pp. 47–57, 1999, doi: 10.1016/S0003-6870(98)00038-6.
- [159] S. Bouchard *et al.*, “Arguing in Favor of Revising the Simulator Sickness Questionnaire Factor Structure When Assessing Side Effects Induced by Immersions in Virtual Reality,” *Front. Psychiatry*, vol. 12, p. 739742, Nov. 2021, doi: 10.3389/FPSYT.2021.739742/FULL.
- [160] “HTC Base station 2PR8100 FCC ID NM82PR8100.” <https://fccid.io/NM82PR8100> (accessed Mar. 28, 2025).
- [161] HTC, “HTC lighthouse Safety and regulatory guide,” *FCC*. Accessed: Mar. 28, 2025. [Online]. Available: <https://fccid.io/NM82PR8100/User-Manual/Safety-Guide-2855756>
- [162] htc corporation, “Tipps für die Einrichtung der Basisstation 1.0.” https://www.vive.com/de/support/vive-pro2/category_howto/tips-for-setting-up-the-base-stations.html (accessed Dec. 05, 2023).

- [163] “OpenVR (Steamworks-Dokumentation).” Accessed: Aug. 31, 2023. [Online]. Available: <https://partner.steamgames.com/doc/features/steamvr/openvr>
- [164] D. Takahashi, “Valve launches OpenVR dev kit for virtual reality hardware makers,” *venturebeat.com*, 2015. <https://venturebeat.com/games/valve-launches-openvr-dev-kit-for-virtaul-reality-hardware-makers/> (accessed Aug. 31, 2023).
- [165] “GitHub - ValveSoftware/openvr: OpenVR SDK.” <https://github.com/ValveSoftware/openvr> (accessed Dec. 29, 2023).
- [166] “OpenXR Overview - The Khronos Group Inc.” <https://www.khronos.org/openxr/> (accessed Dec. 29, 2024).
- [167] “Wie sind die Systemanforderungen?” https://www.vive.com/de/support/vive/category_howto/what-are-the-system-requirements.html (accessed Nov. 26, 2024).
- [168] S. Grassini and K. Laumann, “Are Modern Head-Mounted Displays Sexist? A Systematic Review on Gender Differences in HMD-Mediated Virtual Reality,” *Front. Psychol.*, vol. 11, no. August, 2020, doi: 10.3389/fpsyg.2020.01604.
- [169] F. Koslucher, E. Haaland, A. Malsch, J. Webeler, and T. A. Stoffregen, “Sex differences in the incidence of motion sickness induced by linear visual oscillation,” *Aerosp. Med. Hum. Perform.*, vol. 86, no. 9, pp. 787–793, 2015, doi: 10.3357/AMHP.4243.2015.
- [170] G. Llorach, A. Evans, and J. Blat, “Simulator sickness and presence using HMDs: Comparing use of a game controller and a position estimation system,” in *Proceedings of the ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, VRST*, 2014, pp. 137–140. doi: 10.1145/2671015.2671120.
- [171] J. Munafo, M. Diedrick, and T. A. Stoffregen, “The virtual reality head-mounted display Oculus Rift induces motion sickness and is sexist in its effects,” *Exp. Brain Res.*, vol. 235, no. 3, pp. 889–901, Mar. 2016, doi: 10.1007/s00221-016-4846-7.
- [172] M. Porst *et al.*, “Migräne und Spannungskopfschmerz in Deutschland. Prävalenz und Erkrankungsschwere im Rahmen der Krankheitslast-Studie BURDEN 2020,” 2020. doi: 10.25646/6988.
- [173] G. R. Banta, W. C. Ridley, J. McHugh, J. D. Grissett, and F. E. Guedry, “Aerobic

- fitness and susceptibility to motion sickness.,” *Aviat. Space. Environ. Med.*, vol. 58, no. 2, pp. 105–108, Feb. 1987.
- [174] N. Rawat, C. W. Connor, J. A. Jones, I. B. Kozlovskaya, and P. Sullivan, “The correlation between aerobic fitness and motion sickness susceptibility.,” *Aviat. Space. Environ. Med.*, vol. 73, no. 3, pp. 216–218, Mar. 2002.
- [175] R. T. Jennings, J. R. Davis, and P. A. Santy, “Comparison of aerobic fitness and space motion sickness during the shuttle program.,” *Aviat. Space. Environ. Med.*, vol. 59, no. 5, pp. 448–451, May 1988.
- [176] B. S. K. Cheung, K. E. Money, and I. Jacobs, “Motion sickness susceptibility and aerobic fitness: A longitudinal study,” *Aviat. Sp. Environ. Med.*, vol. 61, no. 3, pp. 201–204, 1990.
- [177] D. L. Harm, L. C. Taylor, and J. J. Bloomberg, “Adaptive Changes in Sensorimotor Coordination and Motion Sickness Following Repeated Exposures to Virtual Environments,” 2007. Accessed: Nov. 24, 2023. [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20070006524>
- [178] Y. Tai, Y. Yang, and X. Wang, “Development of VR Motion Sickness Test Platform Based on UE,” in *Proceedings - 2022 International Conference on Culture-Oriented Science and Technology, CoST 2022*, 2022, pp. 169–173. doi: 10.1109/CoST57098.2022.00043.
- [179] Epic Games and D. Cowley, “Unreal Engine 4.8 Released!,” 2015. <https://www.unrealengine.com/en-US/blog/unreal-engine-48-released> (accessed Jan. 07, 2023).
- [180] M. Scharch, “Vorgehensmodelle in der Softwareentwicklung,” Giessen, 4/2016, 2016.
- [181] W. W. Royce, “Managing the Development of Large Software Systems (1970),” in *Ideas That Created the Future*, 2021, pp. 321–332. doi: 10.7551/mitpress/12274.003.0035.
- [182] A. Gadatsch, “Management von Geschäftsprozessen,” *Manag. von Geschäftsprozessen*, 2002, doi: 10.1007/978-3-322-91983-0.
- [183] J. Goll, “Methoden und Architekturen der Softwaretechnik,” *Methoden und Archit.*

- der Softwaretechnik*, 2011, doi: 10.1007/978-3-8348-8164-9.
- [184] *Der richtige Weg zur Softwareauswahl*. Springer Berlin Heidelberg, 2008. doi: 10.1007/978-3-540-71262-6.
- [185] *DIN 69901-5:2009-01, Projektmanagement_- Projektmanagementsysteme_- Teil_5: Begriffe*. DIN Media GmbH, 2009. doi: 10.31030/1498911.
- [186] Epic Games, “Blueprints visual scripting | Unreal Engine Documentation,” *Unreal Engine 4 Documentation*. <https://docs.unrealengine.com/4.26/en-US/ProgrammingAndScripting/Blueprints/> (accessed Jan. 07, 2023).
- [187] Epic Games, “Blueprint Overview | Unreal Engine Documentation,” *Unreal Engine 4 Documentation*. <https://docs.unrealengine.com/4.26/en-US/ProgrammingAndScripting/Blueprints/Overview/> (accessed Jan. 07, 2023).
- [188] “OpenVR (Steamworks-Dokumentation).” <https://partner.steamgames.com/doc/features/steamvr/openvr?l=german> (accessed Dec. 29, 2023).
- [189] C. Curry, N. Peterson, R. Li, and T. A. Stoffregen, “Postural precursors of motion sickness in head-mounted displays: drivers and passengers, women and men,” *Ergonomics*, vol. 63, no. 12, pp. 1502–1511, 2020, doi: 10.1080/00140139.2020.1808713.
- [190] A. Hösch and A. Hösch, “Simulator Sickness in Fahrsimulationsumgebungen - Drei Studien zu Human Factors,” 2018. Accessed: Nov. 10, 2022. [Online]. Available: https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00037865
- [191] R. S. Kennedy, K. M. Stanney, and W. P. Dunlap, “Duration and exposure to virtual environments: Sickness curves during and across sessions,” *Presence Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 9, no. 5, pp. 463–472, 2000, doi: 10.1162/105474600566952.
- [192] “Set Up the SteamVR Chaperone | Unreal Engine 4.27 Documentation.” <https://docs.unrealengine.com/4.27/en-US/SharingAndReleasing/XRDevelopment/VR/VRPlatforms/SteamVR/HowTo/Chaperone/> (accessed Dec. 11, 2023).
- [193] “Set up your boundary for Meta Quest | Meta Store.” <https://www.meta.com/de->

- de/help/quest/articles/in-vr-experiences/oculus-features/boundary/ (accessed Dec. 11, 2023).
- [194] “Steam-Support :: Häufig gestellte Fragen zu SteamVR Chaperone.” <https://help.steampowered.com/de/faqs/view/30FC-2296-D4CD-58DA> (accessed Dec. 11, 2023).
- [195] “IVRChaperone_Overview · ValveSoftware/openvr Wiki · GitHub.” https://github.com/ValveSoftware/openvr/wiki/IVRChaperone_Overview (accessed Dec. 11, 2023).
- [196] C. Valve, “Safety, Maintenance, Regulatory, and Warranty & Agreement Information, VALVE INDEX™ VIRTUAL REALITY KIT.” 2018.
- [197] M. P. Jacob Habgood, D. Moore, D. Wilson, and S. Alapont, “Rapid, Continuous Movement between Nodes as an Accessible Virtual Reality Locomotion Technique,” *25th IEEE Conf. Virtual Real. 3D User Interfaces, VR 2018 - Proc.*, pp. 371–378, 2018, doi: 10.1109/VR.2018.8446130.
- [198] A. J. Benson and J. R. R. Stott, “Motion Sickness,” *Ernsting’s Aviat. Sp. Med. Fifth Ed.*, pp. 781–796, Jul. 2023, doi: 10.1201/b13197-63.
- [199] M. Pau *et al.*, “Cybersickness in People with Multiple Sclerosis Exposed to Immersive Virtual Reality,” *Bioeng. 2024, Vol. 11, Page 115*, vol. 11, no. 2, p. 115, Jan. 2024, doi: 10.3390/BIOENGINEERING11020115.
- [200] P. Mair and R. Wilcox, “Robust statistical methods in R using the WRS2 package,” *Behav. Res. Methods*, vol. 52, no. 2, pp. 464–488, Apr. 2020, doi: 10.3758/S13428-019-01246-W/FIGURES/9.
- [201] M. S. Ben-Shachar, D. Lüdtke, and D. Makowski, “effectsize: Estimation of Effect Size Indices and Standardized Parameters,” *J. Open Source Softw.*, vol. 5, no. 56, p. 2815, Dec. 2020, doi: 10.21105/JOSS.02815.
- [202] M. G. Kendall, *Rank correlation methods*. Griffin, 1948.
- [203] Y. Hochberg, “A sharper bonferroni procedure for multiple tests of significance,” *Biometrika*, vol. 75, no. 4, pp. 800–802, Dec. 1988, doi: 10.1093/BIOMET/75.4.800.
- [204] M. Kay, L. A. Elkin, J. J. Higgins, and J. O. Wobbrock, “mjskay/ARTool: ARTool

- 0.11.0, R-package.” Apr. 26, 2021. doi: 10.5281/ZENODO.4721941.
- [205] “R: The R Project for Statistical Computing.” <https://www.r-project.org/> (accessed May 26, 2023).
- [206] P. Brown, P. Spronck, and W. Powell, “The simulator sickness questionnaire, and the erroneous zero baseline assumption,” *Front. Virtual Real.*, vol. 3, p. 945800, Sep. 2022, doi: 10.3389/FRVIR.2022.945800/BIBTEX.
- [207] “VR Template - Learn how to get started and use the VR Template as a starting point for your VR projects.” <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/vr-template-in-unreal-engine> (accessed Dec. 25, 2024).
- [208] “Smooth Locomotion For VR - UE5 / UE4.27 | Epic Developer Community.” <https://dev.epicgames.com/community/learning/tutorials/Re65/smooth-locomotion-for-vr-ue5-ue4-27> (accessed Dec. 29, 2024).
- [209] “VR Locomotion Template | Fab.” <https://www.fab.com/listings/2d5fa9b9-89b0-429a-a792-3d510b01bff1> (accessed Dec. 29, 2024).
- [210] C. D. Wood *et al.*, “Habituation and Motion Sickness,” *J. Clin. Pharmacol.*, vol. 34, no. 6, pp. 628–634, 1994, doi: 10.1002/J.1552-4604.1994.TB02016.X.
- [211] J. T. Reason, “Relations between motion sickness susceptibility, the spiral after-effect and loudness estimation,” *Br. J. Psychol.*, vol. 59, no. 4, pp. 385–393, 1968, doi: 10.1111/J.2044-8295.1968.TB01153.X.
- [212] J. F. Golding, “Motion sickness susceptibility questionnaire revised and its relationship to other forms of sickness,” *Brain Res. Bull.*, vol. 47, no. 5, pp. 507–516, Nov. 1998, doi: 10.1016/S0361-9230(98)00091-4.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 VR-Headset (von <i>Entertainment Technology Center</i> aus [12], lizenziert unter CC BY 2.0)	1
Abbildung 1-2 Nutzer einer VR-Brille (eigene Darstellung).....	2
Abbildung 1-3 Notwendigkeit und Prinzip virtueller Bewegungsmethoden: Gelber Smiley = Nutzer, grün = virtuelle Welt, blau = <i>playspace</i> , rote Linie = Grenzen des <i>playspace</i> /mögliche Hindernisse in der realen Welt, graues Dreiecke = Zielpunkt (eigene Darstellung).....	5
Abbildung 3-1 Nutzer einer VR-Brille (1) mit Controllern (2) und System zur Positionserfassung (3) (eigene Darstellung).....	11
Abbildung 3-2 VR-Controller verschiedener VR-Systeme: links = Meta Quest 3, mitte = <i>HTC Vive</i> , rechts = Valve Index (eigene Darstellung).....	12
Abbildung 3-3 VR-Headset von Ivan Sutherland und Haltesystem „Sword of Damocles“ (aus [79] und [84] mit freundlicher Genehmigung von Ivan Sutherland und Aryabrata Basu).....	13
Abbildung 3-4 Datenhandschuh der Firma VPL-Research mit virtueller Entsprechung der getrackten Hand auf dem Cover von <i>Scientific American</i> 1987 (Abbildung von John Brenneis ([88]), mit freundlicher Genehmigung der Familie Brenneis).....	14
Abbildung 3-5 Nintendo Virtual Boy (Evan Amos, zugeschnitten und neu angeordnet aus [89], public domain).....	15
Abbildung 3-6 VR-Brille Oculus Rift CV1 (Evan Amos, zugeschnitten und neu angeordnet aus [104] und [105], public domain)	16
Abbildung 3-7 Bewegung in VR mittels Verschiebung des <i>playspace</i> :.	17
Abbildung 3-8 Rekonstruktion eines Lebermodells (oben) und Darstellung in VR (unten), Boedecker et al. zugeschnitten und neu angeordnet aus [18], lizenziert unter CC BY 4.0	19
Abbildung 3-9 Symptomvergleich MSQ und SSQ (eigene Darstellung, nach Kennedy <i>et al.</i> , 1993 und Mehlitz).....	27

Abbildung 3-10: „HTC Vive“ Virtual Reality Headset (rechts) mit Controllern (Mitte), sowie das eingesetzte Computersystem (links) (eigene Darstellung)	30
Abbildung 3-11 <i>lighthouse</i> Positionserfassung (eigene Darstellung)	31
Abbildung 3-12 Aufstellung der <i>lighthouses</i> : dargestellt sind <i>lighthouses</i> (schwarze Vierecke) die gegenüberliegend aufgestellt sind. Zwischen diesen ist ein gestrichelt dargestellter, kleinerer Bereich eingemessen, der den Bereich darstellt, der für die VR-Nutzung verwendet werden kann (playspace) (eigene Darstellung).....	31
Abbildung 3-13 - Standardimplementation von Teleportation in <i>Unreal Engine 4</i> mit Hilfsanzeigen (Zielbereich und Teleportationspfad) (eigene Darstellung)	37
Abbildung 3-14 Wasserfallmodell nach Scharch, 2016 [180] (eigene Darstellung)	39
Abbildung 3-15 Virtuelle Raumgrenzen am Beispiel der <i>chaperone</i> -Grenzen (eigene Darstellung).....	42
Abbildung 3-16: Testablauf, blaues X = Position des Probanden, weißer Kreis = Zielpunkt, blauer Pfeil = Bewegungsrichtung des Probanden, weißer Pfeil = Bewegungsrichtung des Zielpunktes (eigene Darstellung)	44
Abbildung 3-17: Zielpunkte in der Software (eigene Darstellung).....	45
Abbildung 3-18 Positionen der Zielpunkte und Raummaße (eigene Darstellung)	45
Abbildung 3-19 Die Kollisionskomponente an der Kameraposition/Headsetposition erfasst, wenn der Proband die Zielposition erreicht hat (gelbe Kugel/Gitter) (eigene Darstellung).....	46
Abbildung 3-20 Kollisionskomponente an Zielposition (rotes Gitter) (eigene Darstellung)	46
Abbildung 3-21: Vergleich virtueller Raum und realer Raum (links nach rechts) (eigene Darstellung).....	47
Abbildung 3-22: Testraum mit Schräge (eigene Darstellung)	48
Abbildung 3-23: Testablauf (eigene Darstellung).....	50
Abbildung 4-1: Geschlechterverteilung der Probanden (eigene Darstellung)	54
Abbildung 4-2: Altersverteilung der Probanden (eigene Darstellung)	55

Abbildung 4-3: Verteilung Fehlsichtigkeitsgruppen (eigene Darstellung)	55
Abbildung 4-4: Gruppenverteilung Vorerfahrung mit VR-Systemen (eigene Darstellung)	56
Abbildung 4-5:Selbsteinschätzung Reisekrankheit, Verteilung (links) und Gruppeneinteilung (rechts) (eigene Darstellung)	57
Abbildung 4-6: Sport pro Woche, Verteilung (links) und Gruppeneinteilung (rechts) (eigene Darstellung)	58
Abbildung 4-7: Verteilung der Stunden an Videospiele pro Woche pro Probanden (eigene Darstellung)	59
Abbildung 4-8: Absolutwerte der unterschiedlichen Skalen in Abhängigkeit der Testbedingungen (eigene Darstellung)	61
Abbildung 4-9:Änderung gegenüber Prätest in Abhängigkeit der Testbedingungen (eigene Darstellung)	63
Abbildung 4-10: Totalscores nach Geschlecht eigene Darstellung)	70
Abbildung 4-11: Totalscores nach Fehlsichtigkeitsgruppen (eigene Darstellung)	72
Abbildung 4-12: Totalscores der VR-Vorerfahrungsgruppen (eigene Darstellung)	73
Abbildung 4-13: Totalscores der Selbsteinschätzungsgruppen Reisekrankheit	75
Abbildung 4-14: Totalscores der Gruppen an sportlicher Aktivität (eigene Darstellung)	77
Abbildung 4-15: Totalscores der Altersgruppen ≤ 49 J und. ≥ 50 (eigene Darstellung) ...	79

Hinweis: In dieser Arbeit wurden Bilder verwendet die unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0 (Abbildung 3-8) und CC BY 2.0 (Abbildung 1-1) veröffentlicht wurden. Gemäß den Lizenzbedingen werden an dieser Stelle die Links zu den entsprechenden Lizenzen mitgeteilt.

CC BY 2.0: <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/deed.de>

CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Namen der Autoren, eventuelle Veränderungen an der Arbeit sowie der Vermerk auf die Lizenz finden sich jeweils in den entsprechenden Bildunterschriften.

10 Abkürzungsverzeichnis

VR – Virtual Reality

SK – Simulatorkrankheit

SSQ – Simulator Sickness Questionnaire

MSQ – Motion Sickness Questionnaire

MSSQ – Motion-Sickness-Susceptibility-Questionnaire

VRSQ – Virtual Reality Sickness Questionnaire

11 Publikationsliste

[1] B. Kaus, H. Schneider " Development of a software-tool to evaluate the tolerability of different VR-movement types," *Health and Technology*, vol. 14, no. 4, pp. 781-790, 2024. doi: <https://doi.org/10.1007/s12553-024-00873-4>

[2] B.Kaus, "Locomotion and Simulator Sickness in Virtual Reality" Vortrag auf der *HIMSS 22 Global Health Conference* , Orlando, FL, USA, Mar. 2022.

12 Anhang

12.1 Anhang 1 SSQ (nach Mehlitz [137])

Simulator Sickness Questionnaire

Probanden ID: _____ Datum: _____
 Prätest () Test 1 () Test 2 () Test 3 () Test 4 () Test 5 ()
 Posttest ()

Symptom	Ausprägung			
(1) Allgemeines Unwohlsein	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark
(2) Müdigkeit	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark
(3) Kopfschmerzen	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark
(4) Überanstrengte Augen	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark
(5) Schwierigkeiten beim Scharfsehen	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark
(6) Erhöhter Speichelfluß	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark
(7) Schwitzen	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark
(8) Übelkeit	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark
(9) Konzentrationsschwierigkeiten	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark
(10) Druckgefühl im Kopf	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark
(11) Getrübtes Sehen	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark
(12) Schwindel bei geöffneten Augen	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark
(13) Schwindel bei geschlossenen Augen	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark
(14) Drehschwindel	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark
(15) Wahrnehmung des Magens	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark
(16) Aufstoßen	() nicht vorhanden	() etwas	() deutlich	() sehr stark

12.2 Anhang 2 Lastenheft

Lastenheft

Entwicklung einer Software zur
standardisierten Testung künstlicher
Bewegungsmethoden in Virtual Re-
ality

1 Ausgangssituation und Zielsetzung

Simulatorkrankheit (SK) ist eine Nebenwirkung die in Virtual Realityumgebungen (VR) auftreten kann und mit Unbehagen für Nutzer verbunden ist. Einer der auslösenden Faktoren von SK sind künstliche Bewegungen in VR. Jedoch können auch andere Aspekte der zum Testen verwendeten Software SK-Symptome auslösen, was es erschwert den Einfluss einzelner Bewegungsmethoden isoliert zu betrachten. Geplant ist die Durchführung einer Studie, die die Auswirkungen künstlicher Bewegungsmethoden in VR genauer untersuchen soll. Hierzu wird zunächst eine Software benötigt die möglichst wenige SK-Symptome durch andere Faktoren als die getestete Bewegungsmethode auslöst und eine Möglichkeit bietet künstliche Bewegungsmethoden im direkten Vergleich mit einer Fortbewegung durch natürliches Laufen zu vergleichen.

Geplant ist ein Testablauf in dem ein Proband der Reihe nach verschiedene Bewegungsmethoden testen kann, die durch einen Untersucher vorgegeben werden.

2 Anforderungen

2.1 Bewegungsmethoden

Die Software soll Möglichkeiten bieten, um folgende Bewegungsmethoden in VR zu testen:

1. Natürliche Bewegung: Nutzer läuft und Bewegungsmethoden werden über das Motion Tracking des VR-Systems erfasst
2. Floating movement aktiv: Kamera wird flüssig bewegt, während der Nutzer stillsteht. Die Kontrolle über die Bewegung liegt beim Nutzer
3. Floating movement passiv: Die Kamera wird flüssig bewegt, während der Nutzer stillsteht. Der Nutzer kann die Bewegung nicht kontrollieren. Zwischen den einzelnen Bewegungsabschnitten sollen kurze Pausen implementiert werden, um den Nutzer eine Reorientierung zu erlauben.
4. Teleportation: die Kameraposition wechselt ihre Position abrupt von Start- zu Zielpunkt. Zwischen den einzelnen Bewegungsabschnitten sollen kurze Pausen implementiert werden, um den Nutzer eine Reorientierung zu erlauben.
5. Floating movement passiv mit Schräge: Die Kamera wird flüssig bewegt, während der Nutzer stillsteht. Der Nutzer kann die Bewegung nicht kontrollieren. Die Bewegung erfolgt dabei auch über eine schräge Fläche, um Bewegungen in der Vertikalen zu simulieren. Zwischen den einzelnen Bewegungsabschnitten sollen kurze Pausen implementiert werden, um den Nutzer eine Reorientierung zu erlauben.

2.2 Umfang der Bewegung

Es werden ausschließlich lineare Bewegungen simuliert. Drehen wird in allen Fällen natürlich implementiert erfolgt ausschließlich durch reale Drehung des Nutzers. Mit Ausnahme der Bewegungsmethode 5 finden alle Bewegungsmethoden auf einer ebenen Fläche statt.

2.3 Virtuelle Umgebung

Die Umgebung soll einen Raum rechteckiger Grundfläche ohne ablenkende Elemente darstellen. Die Raumgestaltung soll möglichst minimalistisch gehalten werden mit weißen Wänden und eventuell minimaler Dekoration.

Der Raum soll über ausreichend Platz verfügen, sodass die Bewegungen auch in natürlicher Bewegung absolviert werden können. Die Maße sollen jedoch die Herstellerspezifikationen des Bewegungserfassungssystems (lighthouse) nicht überschreiten (Abstand zwischen Messstationen maximal 5m).

Um Desorientierung zu vermeiden, soll auf virtuelle Grenzen (*chaperone*) verzichtet werden. Anstatt dessen soll sichergestellt sein, dass keine Kollision mit Hindernissen geschehen kann, solange sich die Probanden innerhalb der virtuellen Wände des Raums aufhalten.

2.4 Umsetzung der Bewegungstests

Zur Umsetzung der Bewegungstest soll den Probanden ein Punkt auf dem Boden als Ziel dargestellt werden, dem sie über ca. 20 Stationen folgen müssen. Jedes Mal, wenn Sie den Zielpunkt „betreten“ soll dieser sich automatisch an die nächste Zielposition weiterbewegen. Die genaue Anzahl der Zielpunkte hängt von der Dauer der Tests ab. Zieldauer für die Durchführung von allen 5 Testdurchläufen beträgt 15 Minuten.

Der Ablauf der Tests soll – bis auf die jeweilige Bewegungsmethode identisch sein. Auch die Reihenfolge der Zielpunkte soll sich zwischen den Testdurchläufen nicht unterscheiden, um mögliche Einflussfaktoren zu minimieren.

2.5 Bedienung

Die Umschaltung zwischen den einzelnen Bewegungsmethoden soll über einzelne Tastendrücke erfolgen. Die Standardmethode, in der das Programm startet, soll immer *natural-walking* sein.

Weiterhin ist ein Kommando zu implementieren, um das Programm auf seine Ausgangszustand zurückzusetzen.

3 Zeitplan

- Entwicklung erster Prototyp: 2 Monate
- Initialer Test und Feedbackerhebung: 1Woche
- Ggf. Überarbeitung: 2 Monate

12.3 Anhang 3 Fragebogen zur Probandenerfassung

Probandenerfassung

() Braunfels () MNI () _____

Datum: _____

Name: _____

Email: _____

Probanden-ID: _____

Die erfassten Daten werden lediglich verwendet, um mit Ihnen Kontakt aufzunehmen, für den Fall, dass Sie für eine Folgeuntersuchung in Frage kämen. Die Daten werden nicht an Dritte weitergegeben und nach Abschluss der Studie vernichtet. Alle weiteren Daten der Studie werden ausschließlich pseudonymisiert mithilfe der Probanden-ID erfasst.

Probandenfragebogen (Seite 2)

(7) Besteht eine Fehlsichtigkeit? () ja () nein

falls ja: () kurzsichtig () weitsichtig () beides

Wie viel Dioptrien beträgt die Fehlsichtigkeit?

Links:

Rechts:

Versuch wird durchgeführt () mit Brille () mit Kontaktlinsen () ohne

(8) Konsumieren Sie regelmäßig Videospiele? () ja () nein

falls ja: Wie viele Stunden pro Woche?

(9) Treiben Sie regelmäßig Sport? () ja () nein

falls ja: Wie viele Stunden pro Woche?

(10) Haben Sie Vorerfahrungen mit VR-Systemen? () noch nie getestet () 1-2x getestet () häufiger getestet / eigenes System vorhanden

falls Vorerfahrungen:

() mit Motion-Tracking

() ohne Motion-Tracking

falls eigenes System: Welches?

(11) Wie würden Sie Ihre Anfälligkeit für Reisekrankheit beurteilen:

Auf Schiffen () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6

In anderen Verkehrsmitteln (Auto, Flugzeug, Bus, etc.) () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6

Bei Videospielen () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6

Bei „Rummelplatzattraktionen“ () 1 () 2 () 3 () 4 () 5 () 6
sehr schwach **normal** sehr stark

12.4 Anhang 4 Aufklärung

**für die Probanden-Information und -Einwilligung
zur Durchführung einer wissenschaftlichen Studie
mit volljährigen einwilligungsfähigen Probanden***

Prüfstelle: Institut für medizinische Informatik, FB11, Justus Liebig Universität
Gießen
Prüfarzt: Professor Dr. med. Henning Schneider

Auswirkungen von Virtual Realityanwendungen auf den Körper und ihre Trainierbarkeit

Sehr geehrte Probandin, sehr geehrter Proband,

wir möchten Sie fragen, ob Sie bereit sind, an der nachfolgend beschriebenen wissenschaftlichen Studie teilzunehmen.

Wissenschaftliche Studien sind notwendig, um Erkenntnisse über die Wirksamkeit und Verträglichkeit von medizinischen Behandlungsmethoden zu gewinnen oder zu erweitern. Die wissenschaftliche Studie, die wir Ihnen hier vorstellen, wurde von der zuständigen Ethikkommission zustimmend bewertet. Diese wissenschaftliche Prüfung wird in Gießen und Braunsfels durchgeführt; es sollen insgesamt ungefähr 100 bis 200 Personen daran teilnehmen. Die Studie wird geleitet durch Professor Dr. med. Henning Schneider.

Ihre Teilnahme an dieser wissenschaftlichen Studie ist freiwillig. Sie werden in diese Prüfung also nur dann einbezogen, wenn Sie dazu schriftlich Ihre Einwilligung erklären. Sofern Sie nicht an der wissenschaftlichen Studie teilnehmen oder später aus ihr ausscheiden möchten, erwachsen Ihnen daraus keine Nachteile.

Sie wurden bereits auf die geplante Studie angesprochen. Der nachfolgende Text soll Ihnen die Ziele und den Ablauf erläutern. Anschließend wird ein Prüfarzt das Aufklärungsgespräch mit Ihnen führen. Bitte zögern Sie nicht, alle Punkte anzusprechen, die Ihnen unklar sind. Sie werden danach ausreichend Bedenkzeit erhalten, um über Ihre Teilnahme zu entscheiden.

1. Warum wird diese Studie durchgeführt?

Mit Weiterentwicklung der Technologien im Umfeld der „Virtuellen Realität“ haben sich sog. VR-Brillen (Virtual-Reality-Brillen) mittlerweile schon im privaten Umfeld etabliert. Diese Headsets übersetzen die Umgebung in einen virtuellen, dreidimensionalen Raum, in dem man sich frei bewegen kann, um dort mit Spielen und Apps auf eine Art und Weise zu interagieren, die dem Benutzer das Gefühl gibt, wirklich anwesend zu sein. Die Auswirkungen solcher Systeme auf die Gesundheit sind bislang kaum untersucht. Aus Berichten von Usern und eigenen Vor-Tests sind aber bei bestimmten Anwendungen (Bewegungs-/Beschleunigungssimulation) gesundheitliche Belastungen des Nerven- und kardiorespiratorischen Systems zu erwarten.

* Im Rahmen dieses Textes schließt die männliche Bezeichnung stets die weibliche Bezeichnung mit ein.

Ziel der Arbeit ist die physiologischen Auswirkungen durch verschiedene Virtual-Reality-Szenarien auf gesunde Probanden zu untersuchen. Besondere Berücksichtigung gilt dabei Symptomen im Bereich des Nervensystems z.B. Schwindel und Übelkeit. Die Hypothesen sind:

1. dass es bei bestimmten VR Anwendungsszenarien zu erhöhten körperlichen Belastungen kommt.
2. dass sich gegen diese Belastungen – durch wiederholte Exposition – eine Toleranz aufbauen lässt.

2. Wie ist der Ablauf der Studie und was muss ich bei Teilnahme beachten?

Bei Aufnahme in diese wissenschaftliche Studie werden Sie einer umfassenden ärztlichen Untersuchung unterzogen. Dazu gehört insbesondere die Untersuchung auf bestehende neurologische Vorerkrankungen. Die Möglichkeit Ihrer weiteren Teilnahme an dieser wissenschaftlichen Studie wird von den Ergebnissen dieser Voruntersuchung abhängen.

Bei Teilnahme an der Studie müssen Sie etwa 20 Minuten and Zeit einplanen (eigentliche Studie ca. 10 Minuten + Zeit für Fragebögen und eventuelle Wartezeit). Außerdem müssen Sie unter Umständen zu mehreren Terminen erscheinen.

Während der Studie werden Sie sich in einem Virtual-Reality-Szenario bewegen, in dem eventuell Bewegungen simuliert werden.

3. Welchen persönlichen Nutzen habe ich von der Teilnahme an der Studie?

Sie werden durch die Teilnahme an dieser Studie keinen persönlichen Gesundheitsnutzen haben. Die Ergebnisse der Studie können aber möglicherweise dazu beitragen, die Behandlung von **chronischem Schwindel** zukünftig zu verbessern/besser beurteilen zu können.

4. Welche Risiken sind mit der Teilnahme an der Studie verbunden?

Während der Studie werden Sie sich in mehreren Virtual-Reality-Szenarien bewegen in denen zunehmend künstliche Bewegungen simuliert werden.

Durch die Abweichung dieser simulierten Bewegungen von denen die Ihr Körper in Wirklichkeit ausführt kann es häufig bis sehr häufig zur sogenannten Simulatorkrankheit kommen. Mögliche Symptome sind dabei vor allem Übelkeit, generelles Unwohlsein, Schweißausbrüche, Gleichgewichtsstörungen, Gangunsicherheiten, Orientierungsschwierigkeiten oder Kopfschmerzen mit einer Dauer von bis zu mehreren Stunden.

Bitte teilen Sie den Mitarbeitern der Prüfstelle *alle* Beschwerden, Erkrankungen oder Verletzungen mit, die im Verlauf der wissenschaftlichen Studie auftreten. Falls diese

schwerwiegend sind, teilen Sie den Mitarbeitern der Prüfstelle diese bitte umgehend mit, ggf. telefonisch.

Sollten Sie nach absolvieren der Studie, oder in ihrem Verlauf irgendwelche der oben beschriebenen Symptome verspüren, sollten Sie zunächst nicht am Straßenverkehr teilnehmen und keine schweren Maschinen führen.

5. Wer darf an dieser wissenschaftlichen Studie nicht teilnehmen?

An dieser wissenschaftlichen Prüfung dürfen sämtliche Personen nicht teilnehmen, die unter einer chronischen Krankheit, oder sonstigen Erkrankung des Nervensystems leiden.

Schwangere Frauen sind aus Sicherheitsgründen ebenfalls von der Teilnahme ausgeschlossen.

6. Entstehen für mich Kosten durch die Teilnahme an der wissenschaftlichen Studie? Erhalte ich eine Aufwandsentschädigung?

Durch Ihre Teilnahme an dieser wissenschaftlichen Studie entstehen für Sie keine Kosten.

7. Werden mir neue Erkenntnisse während der wissenschaftlichen Studie mitgeteilt?

Sie werden über neue Erkenntnisse, die in Bezug auf diese wissenschaftliche Studie bekannt werden und die für Ihre Bereitschaft zur weiteren Teilnahme wesentlich sein können, informiert. Auf dieser Basis können Sie dann Ihre Entscheidung zur weiteren Teilnahme an dieser wissenschaftlichen Prüfung überdenken.

8. Wer entscheidet, ob ich aus der wissenschaftlichen Studie ausscheide?

Sie können jederzeit, auch ohne Angabe von Gründen, Ihre Teilnahme beenden, ohne dass Ihnen dadurch irgendwelche Nachteile entstehen.

Unter gewissen Umständen ist es aber auch möglich, dass der Prüfarzt oder der für die Studie Verantwortliche entscheidet, Ihre Teilnahme an der wissenschaftlichen Prüfung vorzeitig zu beenden, ohne dass Sie auf die Entscheidung Einfluss haben. Die Gründe hierfür können z.B. sein:

- Ihre weitere Teilnahme an der wissenschaftlichen Studie ist ärztlich nicht mehr vertretbar;
- es wird die gesamte wissenschaftliche Studie abgebrochen.

Sofern Sie sich dazu entschließen, vorzeitig aus der wissenschaftlichen Studie auszuscheiden, oder Ihre Teilnahme aus einem anderen der genannten Gründe vorzeitig beendet wird, ist es für Ihre eigene Sicherheit wichtig, dass Sie sich einer empfohlenen abschließenden Kontrolluntersuchung unterziehen.

9. Was geschieht mit meinen Daten?

Während der wissenschaftlichen Studie werden medizinische Befunde und persönliche Informationen von Ihnen erhoben und in der Prüfstelle in Ihrer persönlichen Akte niedergeschrieben oder elektronisch gespeichert. Die für die wissenschaftliche Studie wichtigen Daten werden zusätzlich in pseudonymisierter Form gespeichert, ausgewertet und gegebenenfalls weitergegeben. Pseudonymisiert bedeutet, dass keine Angaben von Namen oder Initialen verwendet werden, sondern nur ein Nummern- und/oder Buchstabencode, evtl. mit Angabe des Geburtsjahres.

Die Daten sind gegen unbefugten Zugriff gesichert. Eine Entschlüsselung erfolgt nur unter den vom Gesetz vorgeschriebenen Voraussetzungen. Einzelheiten entnehmen Sie bitte der Einwilligungserklärung, die im Anschluss an diese Probandeninformation abgedruckt ist.

10. An wen wende ich mich bei weiteren Fragen?

Beratungsgespräche an der Prüfstelle

Sie haben stets die Gelegenheit zu weiteren Beratungsgesprächen mit dem auf Seite 1 genannten oder einem anderen Prüfarzt.

Prüfstelle: Institut für medizinische Informatik, FB11, Justus Liebig Universität
Gießen
Prüfarzt: Professor Dr. med. Henning Schneider

Auswirkungen von Virtual Realityanwendungen auf den Körper und ihre Trainierbarkeit

Einwilligungserklärung

.....
Name des Probanden in Druckbuchstaben

geb. am Teilnehmer-Nr. BST3P5.....

Ich bin in einem persönlichen Gespräch durch

Bernhard Kaus.....
im Auftrag des Prüfarztes

ausführlich und verständlich über die zu prüfende Behandlungsmethode und die Vergleichsmethode sowie über Wesen, Bedeutung, Risiken und Tragweite der wissenschaftlichen Studie aufgeklärt worden. Ich habe darüber hinaus den Text der Probandeninformation sowie die hier nachfolgend abgedruckte Datenschutzerklärung gelesen und verstanden. Ich hatte die Gelegenheit, mit dem Prüfarzt über die Durchführung der wissenschaftlichen Prüfung zu sprechen. Alle meine Fragen wurden zufrieden stellend beantwortet.

Möglichkeit zur Dokumentation zusätzlicher Fragen seitens des Probanden oder sonstiger Aspekte des Aufklärungsgesprächs:

Ich hatte ausreichend Zeit, mich zu entscheiden.

Mir ist bekannt, dass ich jederzeit und ohne Angabe von Gründen meine Einwilligung zur Teilnahme an der Prüfung zurückziehen kann (mündlich oder schriftlich), ohne dass mir irgendwelche Nachteile entstehen.

Datenschutz:

Mir ist bekannt, dass bei dieser wissenschaftlichen Prüfung personenbezogene Daten, insbesondere medizinische Befunde über mich erhoben, gespeichert und ausgewertet werden sollen. Die Verwendung der Angaben über meine Gesundheit erfolgt nach gesetzlichen Bestimmungen und setzt vor der Teilnahme an der wissenschaftlichen Prüfung folgende freiwillig abgegebene Einwilligungserklärung voraus, das heißt ohne die nachfolgende Einwilligung kann ich nicht an der wissenschaftlichen Prüfung teilnehmen.

1. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass im Rahmen dieser wissenschaftlichen Studie personenbezogene Daten, insbesondere Angaben über meine Gesundheit, über mich erhoben und in Papierform sowie auf elektronischen Datenträgern bei/inaufgezeichnet werden. Soweit erforderlich, dürfen die erhobenen Daten pseudonymisiert (verschlüsselt) weitergegeben werden an den Verantwortlichen oder eine von diesem beauftragte Stelle zum Zwecke der wissenschaftlichen Auswertung.
2. Außerdem erkläre ich mich damit einverstanden, dass autorisierte und zur Verschwiegenheit verpflichtete Beauftragte des Verantwortlichen sowie die zuständigen Überwachungsbehörden in meine beim Prüfarzt vorhandenen personenbezogenen Daten, insbesondere meine Gesundheitsdaten, Einsicht nehmen, soweit dies für die Überprüfung der ordnungsgemäßen Durchführung der Studie notwendig ist. Für diese Maßnahme entbinde ich den Prüfarzt von der ärztlichen Schweigepflicht.
3. Ich bin bereits darüber aufgeklärt worden, dass ich jederzeit die Teilnahme an der wissenschaftlichen Prüfung beenden kann. Im Fall eines solchen Widerrufs meiner Einwilligung, an der Studie teilzunehmen, erkläre ich mich damit einverstanden, dass die bis zu diesem Zeitpunkt gespeicherten Daten weiterhin verwendet werden dürfen, soweit dies erforderlich ist, um sicherzustellen, dass meine schutzwürdigen Interessen nicht beeinträchtigt werden. Falls ich meine Einwilligung, an der Studie teilzunehmen, widerrufe, müssen alle Stellen, die meine personenbezogenen Daten, insbesondere Gesundheitsdaten, gespeichert haben, unverzüglich prüfen, inwieweit die gespeicherten Daten zu dem vorgenannten Zweck noch erforderlich sind. Nicht mehr benötigte Daten sind unverzüglich zu löschen.
4. Ich erkläre mich damit einverstanden, dass meine Daten nach Beendigung oder Abbruch der Studie zehn Jahre aufbewahrt werden. Danach werden meine personenbezogenen Daten gelöscht, soweit nicht gesetzliche, satzungsmäßige oder vertragliche Aufbewahrungsfristen entgegenstehen (*vertraglich vereinbarte Fristen müssen hier genannt werden*).

- **Ich erkläre mich bereit,**
- **an der oben genannten wissenschaftlichen Studie**
- **freiwillig teilzunehmen.**

Ein Exemplar der Probanden-Information und -Einwilligung habe ich erhalten. Ein Exemplar verbleibt im Prüfzentrum.

.....
Name des Probanden in Druckbuchstaben



.....
Datum

.....
Unterschrift des **Probanden**

Ich habe das Aufklärungsgespräch geführt und die Einwilligung des Probanden eingeholt.

Bernhard Kaus.....
im Auftrag des Prüfarztes

14.12.2018.....
Datum

.....
Unterschrift der aufklärenden Person im Auftrag des Prüfarztes

Nach erfolgter Untersuchung kann () ja
der/die Proband/-in an der Studie () nein
teilnehmen

12.6 Anhang 6 weitere Berechnungen/Tabellen

12.6.1 Posthoc-Vergleich der Bewegungsmethoden untereinander für Subskalen des SSQ

Group	Group	psihat	ci.lower	ci.upper	p.value	p.crit	sig.	R_rankbise- rial
T 1	T 2	-	-4.367	-0.189	0.002	0.006	*	-0.310
T 1	T 3	0.000	0.000	0.000	NaN	0.006		0.000
T 1	T 4	-	-3.897	0.195	0.011	0.013	*	-0.284
T 1	T 5	-	-7.069	0.234	0.008	0.009	*	-0.360
T 2	T 3	1.993	-0.068	4.055	0.007	0.007	*	0.308
T 2	T 4	0.000	0.000	0.000	NaN	0.005		0.017
T 2	T 5	-	-3.095	0.816	0.095	0.025		-0.076
T 3	T 4	-	-3.738	0.321	0.017	0.017	*	-0.282
T 3	T 5	-	-6.884	0.334	0.010	0.010	*	-0.357
T 4	T 5	-	-2.434	1.295	0.378	0.050		-0.090

Tabelle 12-1: Posthoc-Vergleich Nausea

Group	Group	psihat	ci.lower	ci.upper	p.value	p.crit	sig.	R_rankbise- rial
T 1	T 2	0.000	0.000	0.000	NaN	0.013		-0.126
T 1	T 3	0.000	0.000	0.000	NaN	0.010		0.028
T 1	T 4	0.000	0.000	0.000	NaN	0.009		-0.160
T 1	T 5	-0.226	-1.666	1.214	0.650	0.025		-0.191
T 2	T 3	0.000	0.000	0.000	NaN	0.007		0.155
T 2	T 4	0.000	0.000	0.000	NaN	0.006		-0.030
T 2	T 5	0.000	0.000	0.000	NaN	0.006		-0.069
T 3	T 4	-0.113	-1.531	1.305	0.817	0.050		-0.190
T 3	T 5	-0.566	-2.067	0.935	0.278	0.017		-0.218
T 4	T 5	0.000	0.000	0.000	NaN	0.005		-0.041

Tabelle 12-2: Posthoc-Vergleich Oculomotor

Group	Group	psihat	ci.lower	ci.upper	p.value	p.crit	sig.	R_rankbise- rial
T 1	T 2	-13.297	-18.056	-8.537	< 0.001	0.009	*	-0.692
T 1	T 3	0.000	0.000	0.000	NaN	0.005		-0.073
T 1	T 4	-14.543	-19.457	-9.630	< 0.001	0.006	*	-0.696

T 1	T 5	-17.660	-24.708	-10.612	< 0.001	0.010	*	-0.720
T 2	T 3	11.635	6.915	16.355	< 0.001	0.013	*	0.617
T 2	T 4	-1.870	-6.682	2.942	0.263	0.050		-0.049
T 2	T 5	-4.779	-7.933	-1.624	< 0.001	0.017	*	-0.148
T 3	T 4	-13.297	-18.056	-8.537	< 0.001	0.007	*	-0.626
T 3	T 5	-16.621	-21.848	-11.394	< 0.001	0.006	*	-0.658
T 4	T 5	-4.571	-7.713	-1.428	< 0.001	0.025	*	-0.099

Tabelle 12-3: Posthoc-Vergleich Disorientation

12.6.2 Analyse der Einflussfaktoren – Geschlecht

	statistic.W	z_val.W	p.value	r_rank_biserial
m1_2	338.5	-6.103	<0.001	-0.680
m1_3	1150.0	1.223	0.221	0.087
m1_4	370.0	-5.863	<0.001	-0.650
m1_5	277.0	-6.566	<0.001	-0.738
m2_3	1845.0	6.808	<0.001	0.744
m2_4	1040.5	-0.137	0.891	-0.017
m2_5	961.0	-0.785	0.432	-0.092
m3_4	309.0	-6.530	<0.001	-0.708
m3_5	217.0	-7.194	<0.001	-0.795
m4_5	981.0	-0.616	0.538	-0.073
w1_2	455.5	-8.492	<0.001	-0.784
w1_3	1829.5	-2.246	0.025	-0.134
w1_4	538.0	-8.167	<0.001	-0.745
w1_5	425.5	-8.628	<0.001	-0.799
w2_3	3535.5	7.072	<0.001	0.674
w2_4	2024.5	-0.415	0.678	-0.042
w2_5	1656.0	-2.151	0.031	-0.216
w3_4	746.0	-6.844	<0.001	-0.647
w3_5	586.0	-7.563	<0.001	-0.723
w4_5	1775.0	-1.587	0.113	-0.160

Tabelle 12-4: Posthoc tests Geschlecht, Untertests innerhalb Ausprägungen

12.6.3 Analyse der Einflussfaktoren – Fehlsichtigkeit

Test:	statistic.W	z_val.W	p.value	r_rank_biserial
1:0_1	1066.0	-1.041	0.298	-0.071
1:0_2	360.0	0.769	0.442	0.071
1:0_3	60.0	0.282	0.778	0.071
1:1_2	282.0	1.372	0.170	0.146
1:1_3	47.0	0.527	0.598	0.146
1:2_3	12.0	NaN	NaN	NA
2:0_1	1122.0	-0.191	0.849	-0.023
2:0_2	315.5	-0.336	0.737	-0.061
2:0_3	85.0	1.272	0.203	0.518
2:1_2	247.0	0.011	0.991	0.004
2:1_3	62.5	1.229	0.219	0.524
2:2_3	20.0	1.434	0.152	0.667
3:0_1	1207.5	0.705	0.481	0.052
3:0_2	310.5	-0.587	0.558	-0.076
3:0_3	64.0	0.486	0.627	0.143
3:1_2	210.0	-1.285	0.199	-0.146
3:1_3	45.0	0.401	0.689	0.098
3:2_3	15.0	0.641	0.522	0.250
4:0_1	1054.0	-0.696	0.486	-0.082
4:0_2	374.0	0.616	0.538	0.113
4:0_3	42.0	-0.588	0.556	-0.250
4:1_2	293.0	1.004	0.316	0.191
4:1_3	31.0	-0.558	0.577	-0.244
4:2_3	7.0	-0.850	0.395	-0.417
5:0_1	1256.0	0.800	0.424	0.094
5:0_2	359.0	0.369	0.712	0.068
5:0_3	52.0	-0.152	0.879	-0.071
5:1_2	234.5	-0.237	0.813	-0.047
5:1_3	32.0	-0.498	0.618	-0.220
5:2_3	13.0	0.092	0.926	0.083

Tabelle 12-5: Posthoc tests Fehlsichtigkeit Ausprägungen innerhalb Untertests

	statistic.W	z_val.W	p.value	r_rank_biserial
0:1_2	382.0	-7.570	<0.001	-0.756

0:1_3	1449.5	-1.129	0.259	-0.076
0:1_4	508.5	-6.897	<0.001	-0.676
0:1_5	276.0	-8.109	<0.001	-0.824
0:2_3	2607.0	6.515	<0.001	0.663
0:2_4	1574.5	0.036	0.971	0.004
0:2_5	1263.5	-1.828	0.068	-0.194
0:3_4	625.0	-6.011	<0.001	-0.601
0:3_5	389.5	-7.286	<0.001	-0.752
0:4_5	1274.0	-1.745	0.081	-0.188
1:1_2	253.0	-5.900	<0.001	-0.699
1:1_3	880.0	0.637	0.524	0.047
1:1_4	208.0	-6.290	<0.001	-0.753
1:1_5	244.5	-5.988	<0.001	-0.709
1:2_3	1455.0	6.248	<0.001	0.731
1:2_4	788.5	-0.485	0.628	-0.062
1:2_5	784.0	-0.527	0.598	-0.067
1:3_4	182.0	-6.621	<0.001	-0.783
1:3_5	220.0	-6.312	<0.001	-0.738
1:4_5	833.0	-0.066	0.947	-0.009
2:1_2	6.0	-4.148	<0.001	-0.917
2:1_3	54.0	-1.762	0.078	-0.250
2:1_4	24.0	-3.272	0.001	-0.667
2:1_5	18.0	-3.554	<0.001	-0.750
2:2_3	129.0	3.458	0.001	0.792
2:2_4	83.5	0.648	0.517	0.160
2:2_5	59.0	-0.735	0.462	-0.181
2:3_4	34.5	-2.337	0.019	-0.521
2:3_5	25.5	-2.854	0.004	-0.646
2:4_5	52.5	-1.115	0.265	-0.271
3:1_2	1.0	-0.500	0.617	-0.500
3:1_3	2.0	NaN	NaN	NA
3:1_4	0.0	-1.299	0.194	-1.000
3:1_5	0.0	-1.299	0.194	-1.000
3:2_3	3.0	0.500	0.617	0.500
3:2_4	0.0	-1.225	0.221	-1.000
3:2_5	0.0	-1.225	0.221	-1.000
3:3_4	0.0	-1.299	0.194	-1.000

3:3_5	0.0	-1.299	0.194	-1.000
3:4_5	2.0	NaN	NaN	NA

Tabelle 12-6: Posthoc tests Fehlsichtigkeit, Untertests innerhalb Ausprägungen

12.6.4 Analyse der Einflussfaktoren – Vorerfahrung VR

	statistic.W	z_val.W	p.value	r_rank_biserial
1:0_1	814.0	0.458	0.647	0.034
1:0_2	597.0	0.587	0.557	0.053
1:0_3	105.0	0.576	0.564	0.111
1:0_4	70.0	0.459	0.646	0.111
1:1_2	229.5	0.177	0.860	0.020
1:1_3	40.5	0.416	0.677	0.080
1:1_4	27.0	0.306	0.760	0.080
1:2_3	28.5	0.165	0.869	0.056
1:2_4	19.0	0.101	0.919	0.056
1:3_4	3.0	NaN	NaN	NA
2:0_1	761.5	-0.243	0.808	-0.033
2:0_2	530.0	-0.429	0.668	-0.065
2:0_3	121.0	0.828	0.408	0.280
2:0_4	63.5	0.000	1.000	0.008
2:1_2	216.5	-0.201	0.841	-0.038
2:1_3	50.0	0.904	0.366	0.333
2:1_4	27.0	0.141	0.888	0.080
2:2_3	33.5	0.617	0.538	0.241
2:2_4	21.0	0.324	0.746	0.167
2:3_4	2.0	-0.296	0.767	-0.333
3:0_1	761.5	-0.243	0.808	-0.033
3:0_2	530.0	-0.429	0.668	-0.065
3:0_3	121.0	0.828	0.408	0.280
3:0_4	63.5	0.000	> 0.999	0.008
3:1_2	216.5	-0.201	0.841	-0.038
3:1_3	50.0	0.904	0.366	0.333
3:1_4	27.0	0.141	0.888	0.080
3:2_3	33.5	0.617	0.538	0.241
3:2_4	21.0	0.324	0.746	0.167
3:3_4	2.0	-0.296	0.767	-0.333

4:0_1	803.5	0.241	0.810	0.020
4:0_2	550.5	-0.276	0.782	-0.029
4:0_3	108.0	0.671	0.502	0.143
4:0_4	72.0	0.538	0.591	0.143
4:1_2	214.5	-0.363	0.717	-0.047
4:1_3	42.0	0.553	0.580	0.120
4:1_4	28.0	0.424	0.672	0.120
4:2_3	31.5	0.539	0.590	0.167
4:2_4	21.0	0.415	0.678	0.167
4:3_4	3.0	NaN	NaN	NA
5:0_1	787.0	0.000	> 0.999	-0.001
5:0_2	527.5	-0.452	0.651	-0.070
5:0_3	100.5	0.173	0.863	0.063
5:0_4	113.0	1.919	0.055	0.794
5:1_2	217.5	-0.175	0.861	-0.033
5:1_3	42.0	0.301	0.763	0.120
5:1_4	44.0	1.746	0.081	0.760
5:2_3	32.5	0.514	0.607	0.204
5:2_4	33.0	1.863	0.062	0.833
5:3_4	5.0	1.000	0.317	0.667

Tabelle 12-7: Posthoc tests VR-Erfahrung Ausprägungen innerhalb Untertests

	statistic.W	z_val.W	p.value	r_rank_biserial
0:1_2	530.5	-7.758	<0.001	-0.733
0:1_3	1919.0	-0.549	0.583	-0.033
0:1_4	577.5	-7.537	<0.001	-0.709
0:1_5	492.0	-7.926	<0.001	-0.752
0:2_3	3373.0	7.353	<0.001	0.700
0:2_4	1900.5	-0.418	0.676	-0.042
0:2_5	1676.5	-1.537	0.124	-0.155
0:3_4	631.5	-7.191	<0.001	-0.682
0:3_5	537.0	-7.631	<0.001	-0.729
0:4_5	1777.5	-1.026	0.305	-0.104
1:1_2	65.0	-5.240	<0.001	-0.792
1:1_3	298.0	-0.522	0.602	-0.046
1:1_4	89.0	-4.835	<0.001	-0.715

1:1_5	48.5	-5.530	<0.001	-0.845
1:2_3	540.0	4.765	<0.001	0.728
1:2_4	311.0	-0.020	0.984	-0.005
1:2_5	242.0	-1.375	0.169	-0.226
1:3_4	105.0	-4.431	<0.001	-0.664
1:3_5	62.0	-5.196	<0.001	-0.802
1:4_5	246.0	-1.295	0.195	-0.213
2:1_2	36.5	-4.245	<0.001	-0.775
2:1_3	144.0	-0.761	0.447	-0.111
2:1_4	35.5	-4.274	<0.001	-0.781
2:1_5	17.0	-4.806	<0.001	-0.895
2:2_3	271.5	3.645	<0.001	0.676
2:2_4	154.0	-0.243	0.808	-0.049
2:2_5	123.0	-1.251	0.211	-0.241
2:3_4	51.5	-3.668	<0.001	-0.682
2:3_5	32.0	-4.273	<0.001	-0.802
2:4_5	128.5	-1.067	0.286	-0.207
3:1_2	3.0	-0.667	0.505	-0.333
3:1_3	4.5	NaN	NaN	NA
3:1_4	1.5	-1.318	0.188	-0.667
3:1_5	1.5	-1.318	0.188	-0.667
3:2_3	6.0	0.667	0.505	0.333
3:2_4	4.0	0.000	1.000	-0.111
3:2_5	4.0	0.000	1.000	-0.111
3:3_4	1.5	-1.318	0.188	-0.667
3:3_5	1.5	-1.318	0.188	-0.667
3:4_5	6.5	0.685	0.494	0.444
4:1_2	0.0	-1.225	0.221	-1.000
4:1_3	2.0	NaN	NaN	NA
4:1_4	2.0	NaN	NaN	NA
4:1_5	2.0	NaN	NaN	NA
4:2_3	4.0	1.225	0.221	1.000
4:2_4	4.0	1.225	0.221	1.000
4:2_5	4.0	1.225	0.221	1.000
4:3_4	2.0	NaN	NaN	NA
4:3_5	2.0	NaN	NaN	NA
4:4_5	2.0	NaN	NaN	NA

Tabelle 12-8: Posthoc tests VR-Erfahrung, Untertests innerhalb Ausprägungen

12.6.5 Analyse der Einflussfaktoren – Selbsteinschätzung Reisekrankheit

	statis- tic.W	z_val.W	p.value	r_rank_bise- rial
Hoch1_2	154.0	-6.322	<0.001	-0.787
Hoch1_3	598.0	-1.761	0.078	-0.172
Hoch1_4	171.0	-6.159	<0.001	-0.763
Hoch1_5	136.0	-6.512	<0.001	-0.812
Hoch2_3	1213.0	5.318	<0.001	0.680
Hoch2_4	674.5	-0.493	0.622	-0.066
Hoch2_5	550.5	-1.795	0.073	-0.238
Hoch3_4	233.5	-5.293	<0.001	-0.677
Hoch3_5	190.5	-5.739	<0.001	-0.736
Hoch4_5	607.0	-1.198	0.231	-0.159
Mittel1_2	234.0	-6.993	<0.001	-0.769
Mittel1_3	986.0	-0.452	0.651	-0.026
Mittel1_4	235.0	-6.988	<0.001	-0.768
Mittel1_5	184.0	-7.334	<0.001	-0.818
Mittel2_3	1731.5	6.418	<0.001	0.710
Mittel2_4	1012.0	0.000	>0.999	0.000
Mittel2_5	876.5	-1.132	0.258	-0.134
Mittel3_4	293.5	-6.421	<0.001	-0.710
Mittel3_5	238.0	-6.818	<0.001	-0.765
Mittel4_5	877.5	-1.125	0.261	-0.133
Nie- drig1_2	133.0	-4.641	<0.001	-0.661
Nie- drig1_3	433.0	1.342	0.180	0.105
Nie- drig1_4	176.0	-4.019	<0.001	-0.551
Nie- drig1_5	121.5	-4.838	<0.001	-0.690
Nie- drig2_3	683.5	5.367	<0.001	0.744
Nie- drig2_4	380.5	-0.184	0.854	-0.029
Nie- drig2_5	336.5	-0.924	0.356	-0.142

Nie- drig3_4	150.0	-4.698	<0.001	-0.617
Nie- drig3_5	95.0	-5.465	<0.001	-0.758
Nie- drig4_5	357.5	-0.571	0.568	-0.088

Tabelle 12-9: Posthoc tests Reisekrankheit Untertests innerhalb Ausprägungen

12.6.6 Analyse der Einflussfaktoren – Sport

	statistic.W	z_val.W	p.value	r_rank_biserial
1:Niedrig_Mittel	632.0	0.036	0.971	0.003
1:Niedrig_Hoch	636.0	-1.142	0.254	-0.091
1:Mittel_Hoch	650.0	-1.358	0.174	-0.097
2:Niedrig_Mittel	687.5	0.669	0.503	0.091
2:Niedrig_Hoch	799.5	1.082	0.279	0.142
2:Mittel_Hoch	757.0	0.393	0.694	0.051
3:Niedrig_Mittel	684.5	0.987	0.324	0.087
3:Niedrig_Hoch	714.0	0.211	0.833	0.020
3:Mittel_Hoch	673.0	-0.862	0.389	-0.065
4:Niedrig_Mittel	768.5	1.615	0.106	0.220
4:Niedrig_Hoch	836.0	1.463	0.143	0.194
4:Mittel_Hoch	696.5	-0.245	0.807	-0.033
5:Niedrig_Mittel	679.0	0.567	0.571	0.078
5:Niedrig_Hoch	800.5	1.078	0.281	0.144
5:Mittel_Hoch	773.5	0.562	0.574	0.074

Tabelle 12-10: Posthoc tests Sport Ausprägung innerhalb Untertests

	statistic.W	z_val.W	p.value	r_rank_biserial
Hoch1_2	264.5	-5.628	<0.001	-0.669
Hoch1_3	797.5	-0.031	0.975	-0.003
Hoch1_4	293.0	-5.360	<0.001	-0.634
Hoch1_5	264.0	-5.631	<0.001	-0.670
Hoch2_3	1325.0	5.509	<0.001	0.656
Hoch2_4	771.5	-0.277	0.782	-0.036

Hoch2_5	696.5	-1.020	0.308	-0.129
Hoch3_4	300.0	-5.282	<0.001	-0.625
Hoch3_5	271.0	-5.553	<0.001	-0.661
Hoch4_5	722.5	-0.755	0.450	-0.097
Mittel1_2	130.0	-6.437	<0.001	-0.799
Mittel1_3	628.0	-0.498	0.618	-0.031
Mittel1_4	168.0	-6.061	<0.001	-0.741
Mittel1_5	89.0	-6.840	<0.001	-0.863
Mittel2_3	1137.5	6.033	<0.001	0.755
Mittel2_4	681.0	0.376	0.707	0.051
Mittel2_5	525.5	-1.407	0.159	-0.189
Mittel3_4	194.5	-5.673	<0.001	-0.700
Mittel3_5	112.5	-6.506	<0.001	-0.826
Mittel4_5	499.5	-1.705	0.088	-0.229
Nie- drig1_2	136.5	-6.065	<0.001	-0.777
Nie- drig1_3	542.5	-1.244	0.213	-0.114
Nie- drig1_4	149.5	-5.938	<0.001	-0.756
Nie- drig1_5	112.0	-6.331	<0.001	-0.817
Nie- drig2_3	1037.0	5.295	<0.001	0.693
Nie- drig2_4	550.5	-0.732	0.464	-0.101
Nie- drig2_5	516.5	-1.137	0.255	-0.157
Nie- drig3_4	187.5	-5.319	<0.001	-0.694
Nie- drig3_5	153.5	-5.690	<0.001	-0.749
Nie- drig4_5	578.5	-0.398	0.691	-0.056

Tabelle 12-11: Posthoc tests Sport, Untertests innerhalb Ausprägungen

12.6.7 Analyse der Einflussfaktoren – Alter

	statistic.W	z_val.W	p.value	r_rank_biserial
1	509.0	0.067	0.947	0.008
2	332.5	-1.821	0.069	-0.342
3	533.0	0.452	0.651	0.055
4	551.0	0.477	0.633	0.091
5	573.5	0.712	0.477	0.136

Tabelle 12-12: Posthoc tests Altersgruppen (≤ 49 J vs. ≥ 50 J) pro Untertest

13 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt den Probanden, ohne deren Zeiteinsatz diese Studie nicht möglich gewesen wäre.

Ebenso danke ich meinem Doktorvater Herrn Professor Schneider, dafür, dass er mir ermöglicht hat dieses Thema zu verfolgen, für seine engagierte Begleitung während des gesamten Promotionsprozesses und seine konstruktive Kritik.

Weiterhin danke ich meinen Eltern, Herrn Dr. Dr. Siegfried Kaus und Frau Dagmar Scheller Kaus, meiner Schwester, Frau Dr. Sonja Kaus, meiner Freundin Frau Natascha Blum sowie Herrn Andreas Hoek für ihre Unterstützung in Form von Ratschlägen, Hilfe bei der Recherche, dem Vorbereiten der Versuche, gemeinsame Schreibabende oder durch Ablenkung, wenn ich eine Pause brauchte.

Ebenfalls danken möchte ich Herrn Prof. Ivan Sutherland für die Erlaubnis, Bilder seiner Frühen VR-Prototypen zu verwenden, sowie für den fachlichen Austausch. Ebenso Herrn Professor Aryabrata Basu sowie der Familie von Herrn John Brenneis für die Erlaubnis, die entsprechenden Bilder zu verwenden.

Zuletzt danke ich allen weiteren Personen, die mich durch fachlichen Austausch, gute Ratschläge oder Korrekturlesen bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.