

Formulierung von Gestaltungsprinzipien zur  
Entwicklung von VR-Lernumgebungen für den  
naturwissenschaftlichen Unterricht

von

**Marc Bastian Rieger**

geboren in Karlsruhe

Angenommene Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Naturwissenschaften

Fachbereich: Natur- und Umweltwissenschaften

Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau

Berichterstatter:

Prof. Dr. Björn Risch, Landau, Erster Berichterstatter

Prof. Dr. Engelbert Niehaus, Landau, Zweiter Berichterstatter

Tag der Disputation:

30.10.2023

*„Das heißt ... wir sind jetzt in einem Computerprogramm?“*

- Neo

*„Ist das wirklich so schwer zu glauben? Die Anschlüsse an deinem Körper sind weg.  
Du trägst andere Kleidung. Deine Frisur ist ganz anders. [...]“*

- Morpheus

*„Das hier ... ist nicht wirklich?“*

- Neo

*„Was ist die Wirklichkeit? Wie definiert man das? Realität? Wenn du darunter verstehst, was du fühlst, was du riechen, schmecken oder sehen kannst, ist die Wirklichkeit nichts weiter als elektrische Signale interpretiert von deinem Verstand.“*

- Morpheus

Matrix (1999)

## Zusammenfassung

VR ist ein stetig wachsendes Forschungsgebiet, das die Perspektiven und Möglichkeiten der Mensch-Computer-Interaktion erweitert (Hassan & Hossain, 2022). Durch Studien konnte bereits vor dem aktiven Einsatz im Schulalltag eine Vielzahl an positiven Auswirkungen auf den Lernprozess durch die Nutzung von VR nachgewiesen werden (Chavez & Bayona, 2018). Das sogenannte Immersive Learning stellt damit einen Schlüsselbereich zur digitalen Transformation im Bildungsbereich dar. Um VR allerdings im Schulunterricht einsetzen zu können, bedarf es Lernumgebungen, die auf die örtlichen Gegebenheiten und alltäglichen Bedürfnisse eines praktischen Schulunterrichts angepasst sind. Solche Gestaltungsprinzipien sind allerdings im Bildungsbereich noch nicht vorhanden (Johnson-Glenberg, 2018). Diese Arbeit beschäftigt sich damit, Prinzipien aus der Theorie abzuleiten, diese mit Gestaltungskomponenten zu vereinen und darauf aufbauend eine VR-Lernumgebung zu gestalten und zu erforschen. Um eine Praxisnähe bei der Entwicklung und Untersuchung zu gewährleisten, wurde ein Design-Based Research Ansatz gewählt. In aufeinander aufbauenden Mikrozyklen wurden die Gestaltungskomponenten evaluiert und daraus Gestaltungsprinzipien abgeleitet. Die Lernmaterialien wurden fächerübergreifend für die Fächer Chemie und Geografie konzipiert sowie praxisnah mit Teilnehmenden aus vier zehnten Klassen eines Gymnasiums in Rheinland-Pfalz evaluiert. Als Lerninhalt wurde der Kohlenstoffkreislauf gewählt und in den jeweiligen Curricula der Fächer verortet. Der Hauptfokus lag auf dem Fach Chemie, Themenfeld elf „Stoffe im Fokus von Umwelt und Klima“. Als virtueller Ort wurde die Nachbildung eines Abschnitts des außerschulischen Lernorts „Reallabor Queichland“ gewählt. Die Komponenten wurden in insgesamt sieben Mikrozyklen aufgeteilt, nummeriert von null bis sechs. Mikrozyklus null wird genutzt, um den Teilnehmenden den Umgang mit dem VR-System näher zu bringen und den Neuigkeitseffekt abzumildern. Mikrozyklus eins evaluiert die Grundfläche der VR-Lernumgebung mit dem Fokus auf den Realismus der Umgebung. Mikrozyklus zwei beschäftigt sich mit dem zu wählenden Bewegungsradius innerhalb der VR. Mikrozyklus drei untersucht den Effekt von realitätsnahen Hintergrundgeräuschen. Die Mikrozyklen vier bis sechs bestehen aus drei Lernstationen mit unterschiedlichen Interaktionsmöglichkeiten: realitätsnahe Interaktionen, realitätsferne Interaktionen sowie eine Mischung daraus. Erhoben wurden die Skalen räumliches Präsenzerleben, aktuelle Motivation, Realismus, wahrgenommene Bedienbarkeit, wahrgenommene Lerneffektivität und die VR-Skala. Ausgewertet wurden die Daten mit ANOVAs und Pfadanalysen sowie einer übergreifenden Analyse am Ende der Erhebung. Durch das Design der Komponenten konnte ein sehr hohes räumliches Präsenzerleben sowie ein sehr hoher wahrgenommener Realismus erzeugt werden. In den Lernstationen bewerteten die Teilnehmenden die wahrgenommene Lerneffektivität sowie Bedienbarkeit als auch den Zusammenhang von 3-D-Modellen, deren Manipulierbarkeit in VR und der damit verbundene Effekt auf die Lerneffektivität als sehr hoch. Insgesamt konnten aus den vorliegenden Daten zwölf Gestaltungsprinzipien generiert werden. Diese können dafür genutzt werden, neue VR-Lernumgebungen für den praktischen Einsatz im Schulunterricht zu erstellen. Es wurden theoretische Annahmen zur Respezifikation des Prozessmodells des räumlichen Präsenzerlebens getroffen und mit den erhobenen Daten geprüft. Die Anpassung des Modells an moderne VR-Brillen und kognitiv fordernde VR-Lernumgebungen stand dabei im Fokus und ergab sehr gute Modelfit-Werte. In weiterführenden Studien sollten diese Annahmen mit größeren Stichproben überprüft werden.

## Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	.....	<i>Analysis of Variance</i>
AR	.....	<i>Augmented Reality</i>
CAMIL	.....	<i>Cognitive Affective Model of Immersive Learning</i>
CFI	.....	<i>Comparative Fit Index</i>
CI	.....	<i>Confidence interval</i>
CPU	.....	<i>Central Processing Unit</i>
DBR	.....	<i>Design-Based Research</i>
D-Learning	.....	<i>Digital Learning</i>
EFiL	.....	<i>Educational Framework for immersive Learning</i>
E-Learning	.....	<i>Electronic Learning</i>
FAM	.....	<i>Fragebogen zur aktuellen Motivation, Fragebogen zur aktuellen Motivation</i>
FPS	.....	<i>frames per second</i>
GPU	.....	<i>Graphics Processing Unit</i>
HMD	.....	<i>Head Mounted Display</i>
MEC SPQ	.....	<i>Measurement, Effects, Conditions - Spatial Presence Questionnaire</i>
MINT	.....	<i>Mathe, Informatik, Naturwissenschaft, Technik</i>
ML	.....	<i>Maximum Likelihood</i>
M-Learning	.....	<i>Mobile Learning</i>
MZ	.....	<i>Mikrozyklus</i>
RMSEA	.....	<i>Root Mean Square Error Approximation</i>
SEM	.....	<i>Structural Equation Model</i>
SRMR	.....	<i>Standardized Root Mean Square Residual</i>
TLI	.....	<i>Tucker Lewis Index</i>
UE	.....	<i>Unreal Engine</i>
VR	.....	<i>Virtual Reality/ Virtuelle Realität</i>

## Inhalt

1	Einleitung und Ausgangslage .....	1
2	Theoretische Rahmung .....	4
2.1	Virtuelle Realität und räumliches Präsenzerleben .....	4
2.2	Lernen in virtueller Realität .....	10
2.3	Forschungsmethodologie .....	20
3	Konzeption .....	24
3.1	Aufbau der Mikrozyklen 0-6 .....	24
3.2	Auswahl der Entwicklungsumgebung .....	31
3.3	Aufbau der realitätsnahen VR-Umgebung .....	33
3.4	Aufbau der Lernstationen .....	37
4	Methodisches Vorgehen .....	52
4.1	Datenerhebung .....	53
4.2	Datenauswertung .....	56
5	Ergebnisse .....	62
5.1	ANOVA Auswertung .....	62
5.2	Korrelationen .....	82
5.3	Pfadanalysen Mikrozyklus 1 – 6 .....	85
6	Diskussion der kumulierten Ergebnisse .....	105
7	Limitationen und Methodenkritik .....	122
8	Ergebnisdarstellung und Ausblick .....	124
9	Literaturverzeichnis .....	129
I.	Danksagung .....	I
II.	Publikations- und Vortragsliste .....	II
III.	Verzeichnisse .....	II
a.	Abbildungsverzeichnis .....	II
b.	Tabellenverzeichnis .....	V
IV.	Eidesstattliche Erklärung .....	VII
V.	Anhang .....	VIII
VI.	Lebenslauf .....	XVIII

# 1 Einleitung und Ausgangslage

Die digitale Transformation und der Einzug digitaler Medien in die Bildung stehen seit ein paar Jahren zentral im Fokus verschiedener Forschungsbereiche und der medialen Berichterstattung (Klein, 2023). Durch die Corona-Pandemie und die damit einhergehenden Kontaktbeschränkungen stieg die Nachfrage nach digitalen Lehr-Lern-Formaten stark an (ebd.). Für Medien wie Virtual Reality (VR) könnte das eine Möglichkeit sein in Zukunft als Lernformate für die digitale Erweiterung des Schulunterrichts verstärkt in den Fokus rücken. VR ist ein stetig wachsendes Forschungsgebiet, das die Perspektiven und Möglichkeiten der Mensch-Computer-Interaktion erweitert (Hassan & Hossain, 2022). Die OECD (2017) stellte schon vor der Pandemie fest, dass digitale Formate im MINT-Unterricht zur digitalen Transformation der Gesellschaft beitragen können. Durch den darauffolgenden Digitalpakt bestand die Möglichkeit für Bildungsinstitutionen, bessere digitale Medien zu erhalten (Bundesministerium für Bildung und Forschung, 2023). Es sollte dadurch in allen Fächern ermöglicht werden, digitale Lernumgebungen nutzen zu können, um eine digitale Selbstbestimmung und aktive Teilhabe an der Digitalisierung zu schaffen (Pilgrim & Schmitt, 2021). Neue Lehr-Lern-Konzepte können hierdurch ermöglicht werden und digitale Lernformate und -materialien den Unterricht ergänzen (ebd.). Durch die voranschreitende technische Entwicklung der vergangenen Jahre konnte die schon bestehende VR-Technik nun für eine größere kommerzielle Kundschaft aufbereitet werden (Xiong et al., 2021). Schon bevor der kommerzielle Durchbruch erreicht wurde, wurden viele Studien durchgeführt, die der VR-Technik positive Eigenschaften im Lehr-Lern-Kontext attestierten (Kavanagh et al., 2017). So kann zum Beispiel durch das sogenannte räumliche Präsenzerleben, das bei der Nutzung von VR generiert wird, eine starke kognitive Eingebundenheit (engl. Involvement) erzeugt werden, was positive Einflüsse auf das Hörverstehen und die Gedächtnisleistung hat (Roy & Schlemminger, 2014). Die freie Navigation, Autonomie und Präsenzerfahrung bei der Nutzung von VR können sich positiv auf den generellen Lernprozess auswirken (Mikropoulos & Bellou, 2006). Außerdem werden realitätsnahe Erfahrungen ermöglicht, die im realen Alltag unmöglich wären (Hui-Zhen & Zong-Fa, 2014) und das Interesse am Lernen im Vergleich zu traditionell-akademischem Lernen verstärkt (Chandramouli et al., 2014). Zusammenfassend kann gesagt werden, dass VR dazu verwendet werden kann, um realistische Umgebungen, die das Lernen fördern und Lerninhalte beinhalten zu erstellen und erlebbar zu machen. Obwohl bereits einige VR-Lernapplikationen auf dem Markt verfügbar sind, sind viele davon bislang nicht für den Schulunterricht optimiert und gestaltet. Dies wird beispielsweise von Johnson-Glenberg (2018) klar benannt: Es wurden noch keine klaren Standards oder Gestaltungsprinzipien für VR-Lernumgebungen entwickelt, die sich auf den praktischen Schulunterricht anwenden lassen. Durch den aufgezeigten Mangel an Gestaltungsprinzipien, um solche für den Schulalltag spezifischen VR-Lernumgebungen zu programmieren (Johnson-Glenberg, 2019) besteht eine Forschungslücke, in der die positiven Einflüsse auf das Lernen im praktischen Umgang untersucht und attestiert werden. Es besteht also ein großer Bedarf darin, VR-Lernumgebungen für Schulalltagssituationen theoriebasiert zu entwerfen und in der Schulpraxis zu evaluieren. Um die von der OECD (2017) angesprochene digitale Transformation bereits in der Schule zu stützen und neue Technologien wie VR im Schulalltag einsetzen zu können, bedarf es empirisch evaluierter Gestaltungsprinzipien für deren Konzeption. Dadurch kann ermöglicht werden zielgruppengerechte und praxistaugliche Lernumgebungen zu

erstellen. Um solche Prinzipien zu erforschen, bedarf es zunächst einer umfassenden theoretischen Auseinandersetzung mit allen Bereichen, die einen Einfluss auf den Lernprozess in VR-Lernumgebungen haben können. Durch die Interdisziplinarität, die mit der Gestaltung von VR-Lerninhalten einhergeht (zum Beispiel Fachwissen der Lerninhalte, didaktische Aufbereitung, psychologische Lernprozesse, Programmierkenntnisse, etc.) muss über den Rand des eigenen Fachs hinausgeschaut werden, um ein vollständiges Bild aller beteiligten Komponenten zu erhalten. Als einer der zentralen Faktoren für Lernen in VR wird das räumliche Präsenzerleben angesehen (Hofer, 2013). Es wird in einem komplexen, stetigen Prozess der individuellen inneren Evaluation der wahrgenommenen Umgebung gebildet und aufrechterhalten (Wirth et al., 2007). Es vermittelt das Gefühl, dass man dort physisch präsent ist (Wirth, 2012) und hängt stark von der technisch erzeugten Immersion ab, die durch die VR-Brillen unsere visuellen und auditiven Reize beeinflusst (Makransky & Petersen, 2021). Dieser Zustand begünstigt und wird begünstigt durch weitere Variablen, die für Lernerfolg maßgeblich sind, wie etwa die Motivation und das Interesse (Dengel & Mägdefrau, 2018). Hinzukommen tieferliegende psychologische Prozesse, die das Zusammenspiel dieser Variablen bewusst und unbewusst in einem Zwei-Prozess-System steuern (Evans & Stanovich, 2013). Dieser komplexe, subjektive Prozess der Lernen in VR ermöglicht, wird dem sogenannten Immersive Learning (I-Learning) zugeordnet (Dengel, 2022). I-Learning beinhaltet sowohl die immersive Lernerfahrung als auch die Untersuchung der pädagogischen Vorteile der Erfahrung sowie den Einsatz immersiver Lernumgebungen (ebd.). Um eine VR-Lernumgebung zu designen, die alle Variablen, die am komplexen Prozess I-Learnings beteiligt sind, positiv zu beeinflussen, bedarf es einer Forschungsmethodik, die es ermöglicht diese Vielfalt an Theorien und Prozessen adäquat zu erheben, auszuwerten und nach Bedarf empirisch geleitet umzustrukturieren. Hierfür wird Design-Based Research (DBR) als Methodik gewählt, da es den Einsatz unterschiedlicher Erhebungs- und Auswertungsverfahren mit Redesignprozessen in kleinschrittigen Mikrozyklen ermöglicht (Reinmann, 2017). Mit DBR kann ein Wandel im Bildungskontext erfolgreich herbeigeführt werden (Goff & Getenet, 2017) und es ermöglicht die unterschiedlichen Facetten des Untersuchungsgegenstandes sowie des Kontextes zu berücksichtigen (M. Schäfer & Diezemann, 2017). Neben dem Verständnis für den Lernprozess in VR und der dazu passenden Forschungsmethodik bestehen auch Hürden wie etwa die Gestaltung von dazu passendem Lernmaterial. Es ist wichtig, die technischen Vorteile, die VR bieten kann, zu nutzen (Johnson-Glenberg, 2019). So können in der Realität unsichtbare Dinge und Phänomene, wie beispielsweise die Teilchenebene, sichtbar gemacht werden, um den Verstehensprozess zu unterstützen. Ebenso ist es möglich, in der Natur stattfindende Prozesse, wie etwa die Ausgasung von CO<sub>2</sub> aus Fließgewässern durch die Manipulation der virtuellen Umgebung, steuerbar zu machen. Dies kann innovative Lehrformate wie entdeckendes Lernen ermöglichen, bei dem die Lernenden ein hohes Maß an Eigenaktivität haben, um komplexe Phänomene zu bearbeiten und zu verstehen (Forkel, 2009).

All diese Faktoren und Variablen werden in dieser Arbeit gebündelt, miteinander in Beziehung gebracht und mit einem Design-Based Research Ansatz untersucht. Es wird auf der von Johnson-Glenberg (2018) aufgeworfenen Forschungslücke der fehlenden Gestaltungsprinzipien für VR-Lernumgebungen aufgebaut. Die folgenden zentralen Forschungsfragen können aus dieser Genese abgeleitet werden.

(1) Welche allgemeinen Kriterien zur Gestaltung einer Virtual-Reality-Lernumgebung lassen sich aus der Literatur ableiten?

(2) Welche konkreten Gestaltungsprinzipien lassen sich nach der Evaluation der kriteriengeleiteten VR-Lernumgebung formulieren?

Ziel ist es, Gestaltungsprinzipien für VR-Lernumgebungen für den konkreten Einsatz im Unterricht zu entwickeln, um alle Vorteile des Lernens in VR im Schulalltag zu nutzen und somit zukünftige Unterrichtsformate gestalten zu können. Es werden die Faktoren, die für räumliches Präsenzerleben als Prädiktor erfolgreichen Lernens in VR relevant sind, untersucht. Diese Faktoren behandeln sowohl die psychologische, technische, bildungstheoretische und fachliche Ebene unter Berücksichtigung des praktischen Einsatzes an Schulen. Sie werden anhand eines schrittweisen Aufbaus einer VR-Lernumgebung mit der dafür relevanten Zielgruppe integriert und das Design darauf aufbauend evaluiert. Die VR-Lernumgebung wird als virtueller Nachbau eines außerschulischen Lernorts umgesetzt, der die Bearbeitung des Themenkomplexes Kohlenstoffkreislauf ermöglicht. In VR wird ein Ausschnitt der Parkfläche des außerschulischen Lernorts „Reallabor Queichland“ mit Zugang zu einem renaturierten Fluss umgesetzt (Risch et al., 2019). Die Themenbereiche CO<sub>2</sub> (Kohlenstoffdioxid) -Messung, CO<sub>2</sub>-Ausgasung aus Fließgewässern sowie CO<sub>2</sub>-Speicherung durch Bäume werden als Lerninhalte gewählt. Zu jedem dieser drei Themen wird eine VR-Lernstation anhand von aktueller chemisch-umweltwissenschaftlicher Forschung für den Einsatz im alltäglichen Chemieunterricht konzipiert. Es leistet somit einen wesentlichen Beitrag zur digitalen Transformation und hat als Ziel, Forschende und Lehrende zu befähigen, das Potenzial von VR voll auszuschöpfen, um den Bildungsbereich zu revolutionieren und das Spektrum der Lehr-Lern-Methoden zu erweitern. Es ist ein wichtiger Schritt in Richtung einer zukünftigen Bildungslandschaft, in der Technologie und Innovation in der Lehre eine zentrale Rolle spielen.

Um die erste Forschungsfrage zu beantworten zu können, wird eine theoretischen Rahmung (Kapitel 2) erarbeitet und es werden Kriterien identifiziert, denen beim Gestaltungsprozess von VR-Lernumgebungen gefolgt werden muss. Anhand dieser Kriterien wird die zweite Forschungsfrage untersucht, die sich der Konzeption sowie Evaluation der VR-Lernumgebung und daraus resultierenden allgemeinen Gestaltungsprinzipien widmet (Kapitel 3, 4, 5 und 6).



## 2 Theoretische Rahmung

Die folgenden Kapitel umfassen alle als relevant identifizierten Theorien, die für die Planung, das Design und die Evaluierung notwendig sind. Es werden Inhalte aus unterschiedlichen Forschungsbereichen erklärt, die zusammen harmonisieren, ineinandergreifen und aufeinander aufbauen müssen, damit Lernen in VR gelingen kann.

### 2.1 Virtuelle Realität und räumliches Präsenzerleben

Virtuelle Realität (VR) birgt als digitales Medium großes Potenzial für die Weiterentwicklung des MINT-Unterrichts im 21. Jahrhundert (Johnson-Glenberg, 2019). Es können synthetische, interaktive 3-D-Umgebungen erstellt werden, die reale als auch nicht-reale Begebenheiten darstellen können (Huang, 2019). Es ermöglicht reale Orte und Phänomene nachzubilden, die entweder für den Menschen nicht zugänglich oder mit dem menschlichen Auge nicht sichtbar sind (ebd.). So wird ermöglicht unmöglich zumachende Erfahrungen und spezifisches Wissen darüber zu sammeln (Mikropoulos & Natsis, 2011). Mit einem sogenannten Head-Mounted-Display (HMD oder auch VR-Brille) wird Immersion erzeugt. Immersion beschreibt das Maß an Eingebundenheit, dass die Nutzenden durch die sensorische Stimulation des gewählten Gerätes erfahren können (Roy & Schlemminger, 2014). Durch das Ausmaß dieser Stimulation kann es ermöglicht werden, die Umwelt auszublenden und sich ganz auf die VR zu konzentrieren (Cumings & Bailenson, 2016). Die Nutzenden werden somit mental in der VR isoliert und die reale Welt komplett ausgeschlossen (Loomis et al., 1999). Der Grad an Immersion kann von Endgerät zu Endgerät variieren. Faktoren hierfür sind die Qualität der Hardware und wie viele Sinne durch die Technologie stimuliert werden (Makransky & Petersen, 2021). Immersion hat einen positiven Effekt beim Abruf von Wissen im Vergleich zu den herkömmlichen Desktopversionen (Krokos et al., 2019). Die freie Navigation in und die Interaktionen mit der Umgebung sind hierbei maßgeblich, um es als VR-Umgebung charakterisieren zu können (Mikropoulos et al., 1998). Durch die Generierung von individuellen Bildern für jedes Auge kann Tiefenwahrnehmung erzeugt und das visuelle Sichtfeld im Gegensatz zu Desktopmonitoren vergrößert werden (Makransky & Petersen, 2021). Nur wenige Studien geben Auskunft darüber, wie VR im schulischen Alltag konkret eingesetzt werden kann (Pellas et al., 2020). Bildungsangebote und Lernumgebungen sind in der tatsächlichen Nutzung von VR eher selten (Klöß, 2021). Dies liegt unter anderem daran, dass große Hürden wie der Zeitbedarf und die kognitive Belastung der Nutzenden noch nicht ausreichend erforscht wurden (Zender et al., 2018). Unterschiedliche Bedingungen des Lernens in VR wurden bereits generell analysiert, aber ohne einen direkten Bezug zur deutschen Schulpraxis (Johnson-Glenberg, 2019). Als ein zentraler Aspekt für Lernen in VR wird das räumliche Präsenzerleben angesehen (Hofer, 2013). Beim Präsenzerleben wird durch technische Hilfsmittel ermöglicht, an einen entfernten Ort zu gelangen und dort Arbeit zu verrichten oder sich an diesem Ort anwesend zu fühlen, ohne tatsächlich physisch präsent zu sein (Wirth, 2012). Unter dem Begriff Telepresence wurde es von Marvin Minsky (1980) beschrieben. Während des Präsenzerlebens werden kognitive und mentale Kapazitäten dazu verwendet, die reale Umgebung auszublenden, um vollständig in die erzeugte Welt einzutauchen (Hofer, 2013). Das Gefühl der Anwesenheit in dem vom Medium vermittelten Raum wird erlebt (ebd.). Diese Medien können sowohl technischer Art sein (VR, Fernsehen, etc.) als auch erzählter oder gelesener, wie zum Beispiel Bücher oder Erzählungen (ebd.). Unter dem Überbegriff Präsenzerleben werden verschiedene Konzepte

zusammengefasst. Es kann beispielsweise zwischen räumlichem Präsenzerleben (Wirth et al., 2007), Umweltpräsenz (Heeter, 1992) und sozialer Präsenz (Skalski & Tamborini, 2007) unterschieden werden. Beim räumlichen Präsenzerleben verschwindet das genutzte Medium aus der Wahrnehmung der Nutzenden und sie fühlen sich in der ihr präsentierten Umgebung physisch anwesend (Hofer, 2013). Es gibt viele Medien, die vom Konzept des räumlichen Präsenzerlebens profitieren. Beispiele hierfür sind Videospiele (Tamborini & Skalski, 2006), E-Learning Angebote (Psotka, 1995) sowie jegliche Art von Simulationsprogrammen (Biocca & Levy, 1995). Generell ist es ein breit aufgestelltes, interdisziplinäres Forschungsfeld, in dem jede Fachdisziplin versucht, das Phänomen unter ihren spezifischen Aspekten zu erforschen (Hartmann et al., 2015). In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Hervorrufung von räumlichem Präsenzerleben durch die Stimulierung der Sinne mit einem VR-Headmount (VR-HMD).

Räumliche Präsenz gilt als entscheidendes Kriterium für den Lernerfolg in VR-Lernumgebungen (Hofer, 2013). Es wird als eine subjektive Erfahrung beschrieben, bei der der Benutzer das Gefühl hat, in der digitalen Umgebung physisch präsent zu sein, obwohl es sich eigentlich um eine Illusion handelt (Hartmann et al., 2015). In diesem Zusammenhang ist es in hohem Maße von der Immersion abhängig, die mit einem objektiven Niveau der Sensortreue verbunden ist, die ein VR-System erzeugen kann (ebd.). Durch den technischen Fortschritt gelingt es, eine stetig bessere Stimulierung des menschlichen Wahrnehmungssystems zu gewährleisten. Mit steigenden Grafikleistungen, verbesserter Soundqualität sowie Einbezug weiterer Sinne (beispielsweise Haptik) kann das Erfahren von räumlichem Präsenzerleben möglicherweise verbessert werden (ebd.). Ebenso spielen individuelle Aspekte wie Erfahrung und Einstellung zum Medium eine Rolle (Wirth, 2012). Die räumliche Präsenz ist die subjektive psychologische Erfahrung des Nutzenden des VR-Systems (Bowman & McMahan, 2007). Je größer die wahrgenommene physische Präsenz ist, desto mehr wird die aktive Verarbeitung von Informationen gefördert (Hofer, 2013). Daraus kann ein größerer Lern- und Trainingserfolg resultieren (ebd.). Die Theorie des räumlichen Präsenzerlebens wird als zweistufiger Prozess postuliert, der mehreren äußeren Einflüssen und inneren Einstellungen unterliegt (Hartmann et al., 2015). In Abbildung eins wird dieser Prozess schematisch dargestellt. Es zeigt eine zusammenfassende Darstellung des räumlichen Prozessmodells nach Hartmann et al. (2005) sowie der Skala Spatial Presence Questionnaire des Project Presence: Measurement, Effects, Conditions (MEC SPQ) (Vorderer et al., 2004). Im Folgenden wird der Prozess und die Abbildung vertiefend erklärt.

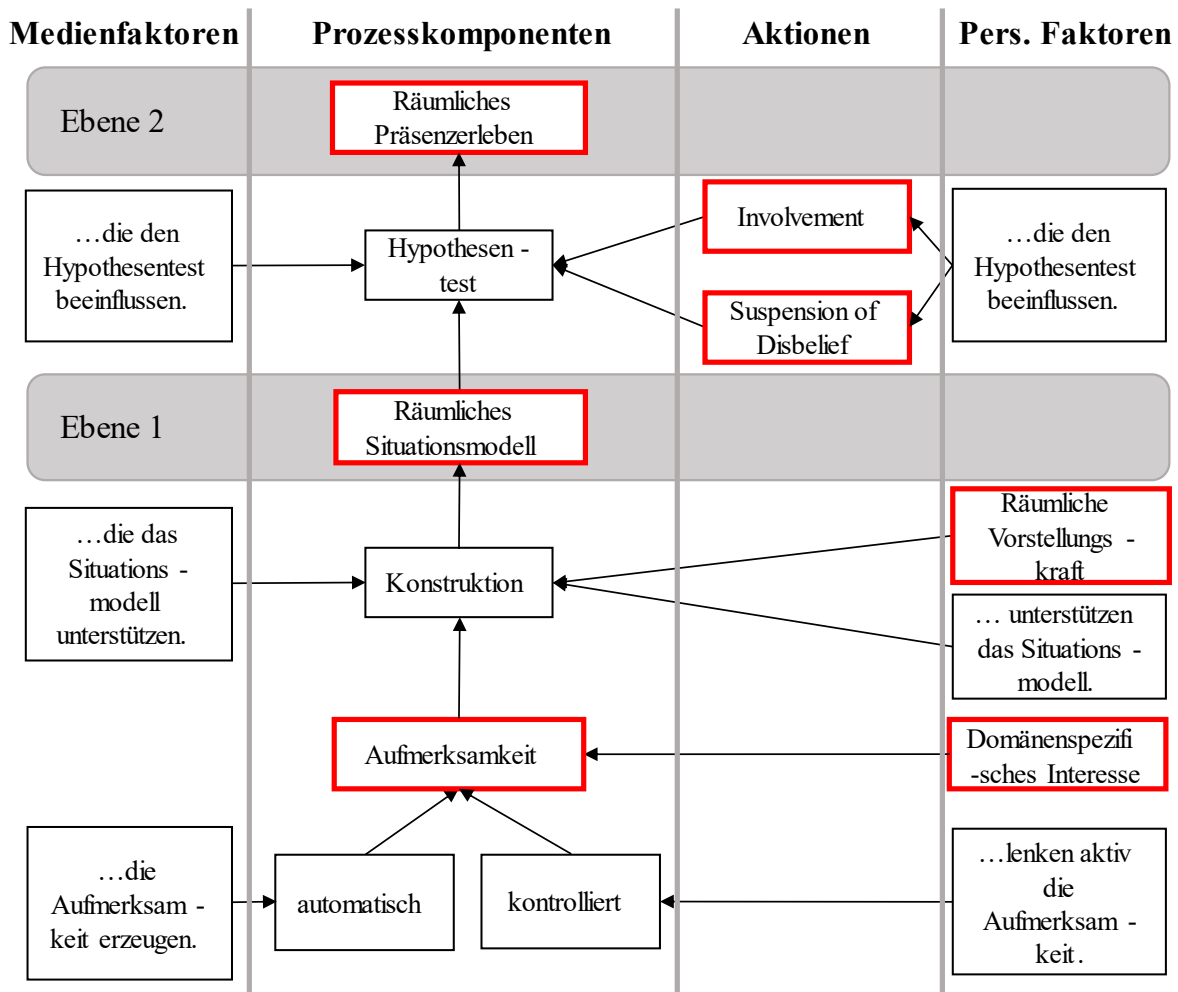


Abbildung 1: Einbindung der Skala zur Erfassung räumlichen Präsenzerlebens (MEC SPQ) (Vorderer et al. 2004). Erhebungsskalen (rot) in eine verallgemeinerte Darstellung des MEC-Modells räumlichen Präsenzerlebens (Hartmann et al. 2005). Eigene Darstellung.

### Räumliches Situationsmodell

Auf der ersten Ebene wird das sogenannte räumliche Situationsmodell gebildet, das, vereinfacht ausgedrückt, das mentale Bild der virtuellen Umgebung darstellt, das der VR-Nutzer während des Eintauchens erzeugt (Hartmann et al., 2005). Die Aufmerksamkeit, die der Nutzer dem virtuellen Raum entgegenbringt, kann entweder automatisch induziert oder bewusst gesteuert werden (ebd.). Nur bei einem ausreichend hohen Grad an Aufmerksamkeit kann das räumliche Situationsmodell entstehen (Wirth, 2012). In VR-Lernumgebungen kann die automatische Aufmerksamkeit möglicherweise aufgrund der anwendungsbezogenen Eigenschaften sehr hoch sein. Die einzige Möglichkeit, der virtuellen Umgebung beim Tragen einer VR-Brille keine Aufmerksamkeit zu schenken, besteht darin, die Augen zu schließen. Visuelle Strukturen und räumliche Hinweise aktivieren beim Nutzenden mentale Prozesse, die die Bildung des räumlichen Situationsmodells fördern (Biocca et al., 2001). Daraus kann geschlossen werden, dass es bei der Umsetzung einer VR-Lernumgebung förderlich ist, eine möglichst hohe Übereinstimmung mit der Realität zu erreichen, um damit mentalen Strukturen der Teilnehmenden zu aktivieren. Dies ist wichtig, da eine Studie von Lee und Kim (2008) gezeigt hat, dass die Präsenzerfahrung durch die Aufmerksamkeit auf räumliche Hinweise zunimmt. Generierte

Aufmerksamkeit (sowohl aktiv durch Elemente in der VR als auch passiv durch den Benutzer) sowie gewecktes Interesse unterstützt und fördert die Erstellung des Situationsmodells (Wirth, 2012). Persönliche Eigenschaften, wie das räumliche Vorstellungsvermögen, unterstützen die Bildung des räumlichen Situationsmodells (Hartmann et al., 2005). Nutzende mit einem verbesserten räumlichen Vorstellungsvermögen können in der Lage sein, fehlende räumliche Hinweisreize durch Erfahrungen oder Vorstellungskraft auszugleichen und so ein stabiles Situationsmodell zu erzeugen, auch wenn das erlebte Produkt unzureichend gestaltet ist (Hartmann et al., 2015).

### **Hypothesentest**

Auf der zweiten Ebene findet der sogenannte Hypothesentest statt, bei dem der VR-Nutzende jede Sekunde der Nutzung überprüft, ob er die ihm präsentierte Welt als neue Realität akzeptiert oder ablehnt (Hartmann et al., 2005). Die virtuelle Welt und die Realität sind die egozentrischen Bezugsrahmen, die miteinander konkurrieren (Wirth, 2012). Wenn die vermittelte Welt nicht überzeugend genug ist und/oder zu viele ablenkende Reize aus der konkurrierenden Realität vorhanden sind, wird die VR-Lernumgebung nicht als neuer Bezugsrahmen akzeptiert, was sich sehr negativ auf die Erfahrung der räumlichen Präsenz auswirkt (ebd.). Wenn die neue Umgebung überzeugend genug ist und die Wahl des neuen Bezugsrahmens ausreichend beeinflusst, wird räumliches Präsenzerleben erlebt (Hartmann et al., 2005). Störende Reize können den Hypothesentest negativ beeinflussen (ebd.). Zum Beispiel Geräusche oder Hindernisse in der Realität sowie technische Fehler oder falsche Darstellungen. Dies wird mit dem Konstrukt Suspension of Disbelief (deutsch: Aussetzen der Ungläubigkeit) operationalisiert. Es wird erhoben, inwieweit die Probanden aktiv Störreize unterdrücken mussten, um sich auf die neue Realität einzulassen (Vorderer et al., 2004). Dies wirkt sich auch negativ im Zusammenhang mit dem räumlichen Situationsmodell bei der Bildung des räumlichen Präsenzerlebens aus (Hofer et al., 2012). Ein wichtiger unterstützender Faktor des Hypothesentests, der mit den Handlungen der Teilnehmenden in enger Verbindung steht, ist das kognitive Involvement.

### **Kognitives Involvement**

Kognitives Involvement (oder auch Eingebundenheit) sorgt für eine intensivere Informationsverarbeitung und ermöglicht es dem Nutzer, sich auf das Medium zu konzentrieren und ihm Aufmerksamkeit zu schenken (Wirth, 2012). In dieser Arbeit wird unter dem Begriff Involvement immer das kognitive Involvement verstanden. In der psychologischen Forschung existieren auch andere Involvement-Varianten, wie beispielsweise das Produktinvolvement (Behe et al., 2015), welche dann aber explizit erläutert und dementsprechend benannt werden. Im verwendeten Modell wird Involvement als eine intensive Form der kognitiven Verarbeitung der Medienumgebung verstanden (Wirth et al., 2006). Involvement ist abhängig vom Inhalt des Mediums und der eigenen Motivation, dieses zu verarbeiten (Hofer, 2016). Je stärker der Nutzer in die Umgebung involviert ist, desto eher ist er bereit, sich intensiver mit den Inhalten der Medienumgebung zu beschäftigen (Hartmann et al., 2015). Somit hat das Involvement einen direkten Einfluss auf den Hypothesentest und kann die räumliche Präsenzerfahrung beeinflussen. Für eine VR-Lernumgebung sollte es sehr relevant sein, das Involvement so weit wie möglich zu erhöhen, um eine intensive Auseinandersetzung mit den Lerninhalten zu fördern.

Involvement lässt sich von der räumlichen Präsenz abgrenzen, indem zwischen Form und Inhalt eines Mediums unterschieden wird. Die Form entspricht allen Medienfaktoren, die Immersion erzeugen, der Inhalt den Aufgaben (Hofer, 2016). Es ist zudem möglich räumlich präsent, aber nicht involviert zu sein (Slater, 2003).

### **Medienfaktoren**

Die Bildung des räumlichen Präsenzerlebens kann über diese Medienfaktoren an mehreren Stellen beeinflusst werden (siehe Abbildung eins). Um die Konstruktion des räumlichen Situationsmodells bei den Teilnehmenden zu manipulieren, können aufmerksamkeitsweckende Medienfaktoren eingesetzt werden (Wirth et al., 2007). Sie lenken die automatische Aufmerksamkeitszuwendung der Teilnehmenden auf die Inhalte der Umgebung, sollte die kontrollierte Aufmerksamkeit auf die Umgebung nicht ausreichend hoch sein (ebd.). Dies können in VR zum Beispiel auditive (speziell positionierte Raumklänge) oder visuelle Reize (blinkende oder leuchtende Gegenstände) sein. Situationsmodellfördernde Hinweisreize können ebenfalls unterstützend eingefügt werden (Hartmann et al., 2005). Diese verhelfen den Teilnehmenden, den Raum mental besser zu erfassen (ebd.). Dies können zum Beispiel Entitäten wie etwa proportional realitätsnahe Bäume, Steine oder Gegenstände sein, aber auch Wegstrecken, die einem bekannten Einheitsmaß entsprechen oder ein Raumklang, der die Distanz zum Objekt und die eigene Position im Raum erkennen lässt. Um auf der zweiten Ebene den Hypothesentest aktiv beeinflussen zu können, können ebenfalls Medienfaktoren genutzt werden (siehe Abbildung eins). Diese müssen den Entscheidungsprozess der Nutzenden positiv unterstützen, damit die Umgebung als neue Realität angenommen wird. Durch Kohärenz der Umgebung kann das erreicht werden (Gilbert, 2016). Daraus wird geschlossen, dass in realitätsnahen Umgebungen unrealistische Proportionen oder Bewegungsabläufe, unnatürliche Farben, Formen oder Geräusche einen negativen Einfluss haben. Da die Medienfaktoren auf allen Ebenen des räumlichen Präsenzmodells Einfluss ausüben (siehe Abbildung 1) wird aus der Theorie der einzelnen Variablen wie dem Involvement und dem räumlichem Situationsmodell geschlossen, dass die technische Ebene einen maßgeblichen Einfluss haben kann.

### **Zwei-Prozess-Theorie (Dual process theory)**

Um das Zusammenspiel von räumlicher Präsenzerfahrung, Involvement und Medienfaktoren besser zu verstehen, ist es notwendig, die Zwei-Prozess-Theorie (duales Prozessmodell) zu erläutern. Die Zwei-Prozess-Theorie besagt, dass die menschliche Informationsverarbeitung in zwei Systemen oder Typen abläuft (Evans & Stanovich, 2013). Da die Begriffe nicht einheitlich in der Literatur verwendet werden, wird in dieser Arbeit die Bezeichnung Typ nach Evans & Stanovich (2013) genutzt. Typ eins ist ein schnell arbeitendes, autonomes System, das Standardreaktionen ausführt, die keine anspruchsvollen Denkprozesse erfordern (ebd.). Typ zwei arbeitet langsamer und ist für kognitiv anspruchsvolle Prozesse zuständig (ebd.). Es umfasst beispielsweise hypothetisches Denken und nutzt das Arbeitsgedächtnis (ebd.). Hartmann postuliert auf dieser Grundlage, dass die Präsenzerfahrung überwiegend im Typ eins gebildet wird, da es sich um eine feste, schnell abrufbare und unbewusste Struktur handelt (Hartmann et al., 2015). Es wird angenommen, dass Involvement dagegen aufgrund seiner Komplexität und der Notwendigkeit komplexer kognitiver Prozesse im Typ zwei gebildet wird (Hofer, 2016).

Sowohl Typ eins als auch Typ zwei können gleichzeitig genutzt werden und simultan arbeiten (Durning et al., 2015). Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass bei komplexen VR-Lernumgebungen neben der Präsenzerfahrung auch das Involvement eine zentrale Rolle spielt. Einerseits sollte Typ eins idealerweise ein hohes Maß an Präsenzerfahrung ohne Einschränkungen oder Widersprüche erzeugen, um die positiven Effekte für das Lernen verfügbar zu machen. Andererseits muss Typ zwei stimuliert werden, um die Hypothesenprüfung zu stärken und eine intensive Auseinandersetzung mit dem Lernstoff zu gewährleisten. Um in Typ eins bei der Nachbildung eines realen Ortes keine Widersprüche zu erzeugen, sind der Realismus und die Authentizität wichtige Faktoren (Gilbert, 2016).

### **Realismus**

Virtuelle Realität erzeugt eine geringere Menge an sensorischen Stimulationen als die reale Welt. Beispielsweise fehlen Stimulationen des Tast- und Riechsinnes. Bei der Konzeption der VR-Lernumgebung ist es daher wichtig, dass die Annahmen und Erwartungen der Nutzenden an die virtuelle Umgebung mit einzubeziehen und hervorzuheben (Gilbert, 2016). Dies stärkt die Wahrnehmung der Authentizität und hilft dabei, diese als neue Realität anzunehmen und somit die Bildung des räumlichen Präsenzerlebens zu verbessern (ebd.). Zur Erhebung des Realismus haben Pöschl & Döring (2013) die Subskala Szenenrealismus der German VR Simulation Realism Scale erforscht. Sie erfasst die Natürlichkeit der visuellen Reize wie Reflexionen, Licht und Schatten, die genutzten Farben, die Dreidimensionalität sowie die gewählten Proportionen. Bei der Nachbildung eines realen außerschulischen Lernorts wird angenommen, dass die Nutzenden erwarten, eine möglichst detailgetreue Umgebung vorzufinden. Ebenso, dass diese nach den uns bekannten Naturgesetzen funktioniert und mit realitätsnahen 3-D-Modellen ausgestattet ist. Neben diesem visuellen Realismus sind für das Gesamterlebnis und die Kohärenz auch auditive Reize der Umgebung wichtig. Auch sie müssen, um die Authentizität der Umgebung zu gewährleisten, realitätsnah umgesetzt werden. Hierfür wird der Forschungsbereich der audiovisuellen Kartographie in den Fokus gerückt.

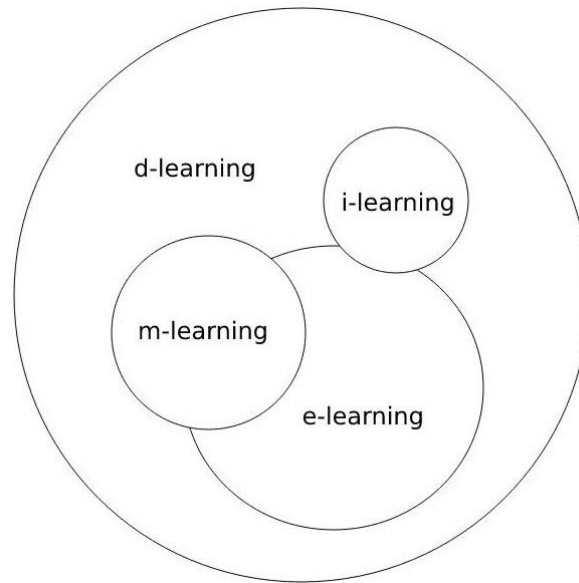
### **Audiovisuelle Kartographie**

In der audiovisuellen Kartographie haben sich vier auditive Hauptelemente etabliert: abstrakte Klänge und Tonfolgen, Sprache, Musik und audiorealistische Sequenzen, sogenannte Soundscapes (Edler et al., 2019). Soundscapes originieren aus der Landschaftsforschung und sind insbesondere im sozialkonstruktivistischen Forschungsbereich als nicht-visuelle Reize für individuelle Eindrücke und Bedeutungen der erlebten Landschaft von Relevanz (Edler et al., 2019). Diese Soundscapes sind auch für VR-Lernumgebungen wichtig. Die Bildung von Landschaftsinterpretation und -bewertung ist ein sehr komplexer Prozess (Stotten, 2013). Die Vermittlung von Landschaftstypen ist institutionell geprägt und wird durch verschiedene Medien wie Bücher, Filme und Fotos beeinflusst (Linke, 2017). Es wird unterschieden in eine durch Sozialisierung bereits in jungen Jahren erworbene native regular landscape und durch Institutionen vermittelte stereotypical landscapes (Kühne, 2018). Wichtig hervorzuheben ist hierbei, dass bei der native regular landscape eine starke emotionale Bindung vorherrscht, die auch von nicht-visuellen Impressionen und Stimulationen geprägt ist (Edler et al., 2019). Hierzu gehören Sprache, Geräusche, Gerüche, Farben und Gesten (Hüppauf, 2007). Durch die Nachbildung eines

realen, außerschulischen Lernorts und der Evaluation desselben an einer lokal benachbarten Schule ist dieser Aspekt besonders hervorzuheben. Die emotionale Bindung und die nicht-visuellen auditiven Reize der VR-Lernumgebungen könnten somit das Präsenzerleben maßgeblich beeinflussen. Sie werden in der Unreal Engine 4 (UE 4) als Raumklänge eingefügt und simulieren so zusätzliche Aspekte der realitätsnahen Umgebung (siehe Kapitel 2.4). Die Gestaltung und das Erleben von hochrealistischen Landschaftsdarstellungen mit realistischen Audioklängen gehören zu den Grundlagen der Umsetzung eines außerschulischen Lernorts in VR mit einem angestrebten hohen Präsenzerleben. Allerdings steht die auditive Dimension in VR-Landschaften der Kartografie und der Geoinformationswissenschaften noch nicht im Fokus der Forschung (Edler et al., 2019).

## **2.2 Lernen in virtueller Realität**

Um Lernen in der virtuellen Realität näher betrachten zu können, ist es notwendig, eine Verortung vorzunehmen. Kumar Basak et al. (2018) unterscheiden in einer Meta-Studie zwischen Digital Learning (D-Learning), Electronic Learning (E-Learning) und Mobile Learning (M-Learning). Jede dieser Lernformen wird als technologisches Lernen verstanden, da die Lerninhalte von technischen Geräten dargeboten und für diese optimiert werden (ebd.). Als D-Learning wird jede Art des Lernens verstanden, das mit und durch den effektiven Einsatz von Technologie erleichtert wird (ebd.). E-Learning wird als Teilmenge von D-Learning angesehen (ebd.). Es zeichnet sich vor allem durch den Einsatz von Computer-Netzwerk-Technologie wie etwa dem Internet aus (M. Wang et al., 2010) und umfasst das Lernen mit Hilfe elektronischer Werkzeuge und Medien. M-Learning wiederum gilt als Erweiterung des E-Learning, da es sich derselben Elemente bedient, aber auf eine Zielgruppe beschränkt, die mobile Endgeräte nutzt (Behera, 2013). Alle drei Lernarten sind eng miteinander verwandt (Kumar Basak et al., 2018). VR-Brillen können durch die neusten auf dem Markt verfügbaren Modelle auch als mobile Endgeräte angesehen werden, da eine eigenständige freie Nutzung ohne PC oder Laptop möglich ist. Durch die hohe Immersionsfähigkeit der VR-Brillen werden aber solche mobilen Versionen trotzdem nur stationär genutzt, da sie das gesamte Blickfeld abdecken. Ein Betrieb während der Bewegung, beispielsweise im Straßenverkehr, wäre zu gefährlich. Lernen in VR wird als Teilmenge von D-Learning angesehen (Kumar Basak et al., 2018). Eine klare Verortung und Abgrenzung von Immersive Learning ist nicht möglich, da es auf subjektiver Immersion basiert (Makransky & Petersen, 2021) und Elemente des E-Learning nutzen kann. Immersive Learning wird definiert als Lernen mit und durch künstliche Erfahrungen (Dengel, 2022) und bildet daraus abgeleitet eine eigene Teilmenge innerhalb von D-Learning, die Überschneidungspunkte zum E-Learning aufweist (Abbildung 2).



**Abbildung 2: Exemplarische Darstellung der Teilmengen von D-Learning angelehnt an Kumar Basak (2018). Eigene Darstellung.**

### **Immersive Learning**

I-Learning kann als neuer, aktivierender Lernansatz angesehen werden (Dengel & Mägdefrau, 2018). Eine genaue Definition des Begriffs ist schwierig, da er von vielen verschiedenen Forschungsfeldern geprägt ist und aus unterschiedlichen Perspektiven interpretiert werden kann (Dengel, 2022). Dengel (ebd.) schlägt drei Definitionen vor, die den Begriff jeweils mit einem eigenen Schwerpunkt betrachten: aus der Perspektive des Forschenden, des Lernenden und des Lehrenden. Die des Forschenden wird als Immersive Education kategorisiert, die des Lernenden als Immersive Learning und die des Lehrenden als Immersive Teaching (ebd.). Immersive Learning wird hierbei als interner Prozess des Lernenden verstanden, Immersive Education als Forschungsbereich und Immersive Teaching als Unterrichtsmethode (ebd.).

*Immersive Learning* : „*Immersive Learning is the active construction and adaption of cognitive, affective, and psychomotor models through artificial experiences that are perceived as nonmediated*“ (Dengel, 2022, S. 3).

*Immersive Education*: „*Immersive Learning investigates the educational benefits provided by artificial experiences that are perceived as non-mediated*“ (ebd.).

*Immersive Teaching*: „*Immersive Learning is an educational method where artificial experiences that are perceived as non-mediated are used as learning tools*“ (ebd.).

Da die Erforschung der Gestaltungsprinzipien einer VR-Lernumgebung und den Einsatz in einer realen Schulumgebung im Fokus stehen, sind daher alle drei Definitionen und Perspektiven relevant. Die Lernumgebung muss optimal für die Lernenden konzipiert sein, um die aktive Konstruktion von Wissen zu erleichtern (Immersive Learning). Sie muss als Methode im Unterricht einsetzbar sein und damit möglichst praxisnah erprobt werden (Immersive Teaching). Es muss untersucht werden, welche Lernvorteile die immersive VR-Lernumgebung bietet (Immersive Education).

Immersives Lernen wird maßgeblich durch Immersion, Präsenz, Motivation sowie kognitive



und emotionale Faktoren beeinflusst (Dengel & Mägdefrau, 2018). Immersion entsteht maßgeblich durch die verwendete Hardware, da sie die Reize aus der physischen Realität ausblendet und eine künstliche simuliert (Hartmann et al., 2015). Dieser objektive Prozess der Immersion ist Teil des Lehrprozesses, da das Lernmaterial mit einer bestimmten didaktischen, immersiven und inhaltlichen Qualität präsentiert wird (ebd.). Daraus lässt sich schließen, dass es sehr wichtig ist die Hardware den Anforderungen der Lernumgebung und den Lernzielen anzupassen. Makransky und Petersen (2021) sehen eine der größten Hürden für den Einsatz von immersivem Lernen im Fehlen von Theorien und Kriterien, die die Forschung und Entwicklung der immersiven VR-Lernumgebungen leiten. Die Grundlagen zur Erforschung der Variablen, die für diese Kriterien relevant sind, können Immersive Learning Frameworks entnommen werden.

### **Educational Framework for immersive Learning (EFiL)**

Dengel und Mägdefrau (2018) entwarfen das Educational Framework for immersive Learning (EFiL) und lokalisierten die Einflussfaktoren darin. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich, sofern nicht anders angegeben, auf diese Publikation. I-Learning wird maßgeblich von Immersion, Präsenz, Motivation sowie kognitiven und emotionalen Faktoren beeinflusst. Wie bereits aufgezeigt hängt Immersion von der genutzten Hardware ab, indem sie Reize der physischen Realität ausblendet und eine künstliche simuliert. Sie schließen daraus, dass dieser objektive Prozess der Immersion Teil des Lehrangebots ist, da das Lernmaterial mit einer bestimmten didaktischen, immersiven und inhaltlichen Qualität dargeboten wird. Die Zeit, die im immersiven Lernangebot verbracht wird, hängt von verschiedenen Kontextfaktoren ab. Als zentralen Wahrnehmungs- und Interpretationsfaktor sehen sie die Präsenz. Die Lernaktivität wird nicht automatisch ausgelöst und muss erst durch Wahrnehmung des immersiven Inhalts gestartet werden. Ein höheres Gefühl der Präsenz durch die Wahrnehmung des Vor-Ort-Seins (räumliches Präsenzerleben) verbessert die Lernaktivität. Die kognitiven Faktoren werden in diesem Modell als alle intraindividuellen kognitiven Eigenschaften und Fähigkeiten zusammengefasst, die die Lernaktivitäten beeinflussen, wie etwa Intelligenz, Lernstrategien und reflektierendes Denken. Die kognitiven Eigenschaften und Fähigkeiten sind eng mit der Wahrnehmung verbunden und beeinflussen das Präsenzerleben. Aktiviert werden sie durch didaktische und methodische Gestaltung der Lerninhalte im immersiven Medium. Immersives Lernen wird nach ihnen demnach als Lernaktivität, die durch eine medial vermittelte oder angereicherte Umgebung initiiert wird und ein Gefühl der Präsenz hervorruft, definiert.

### **Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL)**

Makransky und Peterson (2021) veröffentlichten drei Jahre danach das Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL), um Lernmethoden und Faktoren aufzuzeigen, die das Lernen in immersiven VR-Lernumgebungen maßgeblich beeinflussen können. Sie vertreten wie Dengel und Mägdefrau (2018) die Ansicht, dass Immersion, Präsenz, Motivation sowie kognitive und emotionale Faktoren an der Bildung des Präsenzerlebens entscheidend mitwirken.

Zwei der wichtigsten Faktoren des Modells sind die Erfahrung der Präsenz (englisch: Presence) und das Gefühl der Handlungsfähigkeit (englisch: Agency) (Makransky & Petersen, 2021). Handlungsfähigkeit beschreibt die Wahrnehmung, Handlungen zu erzeugen und zu

kontrollieren (Moore & Fletcher, 2012). Makransky und Petersen (2021) sehen in der Möglichkeit, die virtuelle Repräsentation des Selbst sowie die Umwelt und ihre Objekte zu manipulieren, den wichtigsten Prädiktor für Handlungsfähigkeit. Als entscheidender Einfluss auf Präsenz und Handlungsfähigkeit gelten im Modell die Immersion, die Kontrollfaktoren und die Repräsentationstreue des Endgeräts (siehe Abbildung 3). Das CAMIL-Modell beschreibt aufbauend darauf, dass Präsenz und Handlungsfähigkeit sechs Faktoren beeinflussen und diese sich auf die Lernergebnisse auswirken (Makransky & Petersen, 2021). Nämlich: Interesse, Motivation, Verkörperung, Selbstwirksamkeit, kognitive Belastung sowie Selbstregulation (ebd.). Die Faktoren Interesse, Motivation und Verkörperung werden nachfolgend vertiefend ausgeführt. Die kognitive Belastung, Selbstregulation und Selbstwirksamkeit stehen in engem Zusammenhang mit genutztem Lernmaterial und dem individuellen Lernprozess. Da diese Forschungsarbeit keine Untersuchung der Lernwirksamkeit der Materialien als Ziel hat, werden diese Faktoren nicht untersucht und deshalb nicht weiter ausgeführt.

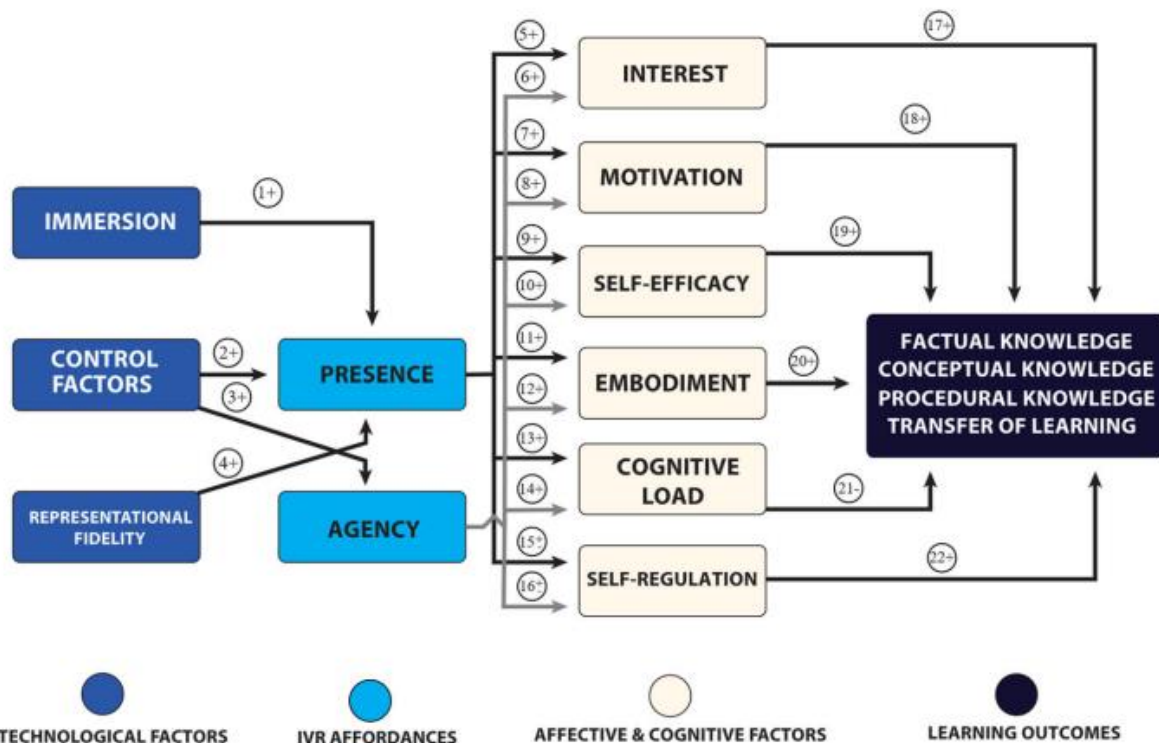


Abbildung 3: Darstellung des CAMIL Framework nach Makransky und Peterson (2021).

## **Motivation**

Eine verallgemeinerte Darstellung der Motivation lautet, dass Verhalten so gewählt wird, dass möglichst positive Erlebnisse gefördert und negative vermieden werden (Bak, 2019). Positive Ereignisse bestärken Verhalten, diese Erlebnisse zu erreichen, negative aktivieren Strukturen, damit wir diese vermeiden (ebd.). Motivation ist ein sehr komplexes Konstrukt, das viele Facetten aufweist, die in der psychologischen Forschung untersucht werden (Rheinberg & Vollmeyer, 2019). So gibt es zum Beispiel Leistungsmotivation, Machtmotivation oder auch Strukturen innerhalb des Motivationskonstrukts wie intrinsische und extrinsische Motivation (ebd.). Im Fokus steht die Motivation die Lernen, I-Learning und Präsenz beeinflusst. Die Motivation ist ein wichtiger Faktor für schulisches Lernen (Dengel & Mägdefrau, 2018). Sie tritt als globale oder kontextuelle Motivation auf und bildet ein stabiles, individuelles Konstrukt, das nur langsam verändert werden kann (ebd.). Im schulischen Kontext können die Motivation zum Lernen im Allgemeinen oder für ein bestimmtes Fach als Beispiele genannt werden (ebd.). Im Gegensatz zur globalen Motivation steht die situative (oder auch aktuelle) Motivation, die sich auf eine aktuelle Tätigkeit bezieht und von situationsbezogenen Einflüssen geprägt ist (Heckhausen & Heckhausen, 2006). Rheinberg et al. (2001) operationalisieren die aktuelle Motivation in die vier Subskalen Interesse, Misserfolgsbefürchtung, Erfolgswahrscheinlichkeit und Herausforderung. Damit wird das für das immersive Lernen relevante Interesse (Dengel & Mägdefrau, 2018; Makransky & Petersen, 2021) innerhalb der Motivation verortet. Rheinberg et al. (2001) beschreiben, dass Verhaltenstendenzen aus der Wechselwirkung zwischen Personen- und Situationsfaktoren entstehen – die sogenannten *Motive*. Diese beschreiben hochgeneralisierte Merkmale von Personen, welche dazu anregen, bestimmte Anreize zu bevorzugen (ebd.). Diese werden ebenfalls von situativen Faktoren beeinflusst, die die gegebene Situation bereitstellt (ebd.). Wenn diese Anregungsmerkmale mit den Motiven der Person übereinstimmen, kann eine aktuelle Motivation entstehen, die das Verhalten direkt beeinflusst (ebd.). Situative Reize können im schulischen Kontext unter anderem die Teilnahme an einer Studie, interessante Lerninhalte, die Nutzung von VR oder aber auch das Fernbleiben vom Regelunterricht durch die Studienteilnahme sein. Für die Erforschung von Gestaltungsprinzipien für VR-Lernumgebungen ist diese aktuelle Motivation wichtig, da sie es ermöglicht die situativen, motivationalen Gegebenheiten der Lernenden vor dem Eintauchen in die VR zu erfassen, um die entstehenden Ergebnisse während der Evaluation vertiefender interpretieren zu können.

Bei der Nutzung eines neuen Mediums im Zusammenhang mit Untersuchungen des Lernprozesses oder der Lernergebnisse sollte der sogenannte Neuigkeitseffekt mit bedacht werden, der eng mit der Lernmotivation verknüpft ist (Kerres, 2003). Er steigert die Lernmotivation durch den Einsatz des Mediums bei den Lernenden (ebd.). Es ist ein sprunghafter Anstieg der Motivation, der aber ebenso schnell wieder absinken kann und den Aufwand der Einführung neuer Medien oft nicht rechtfertigt (ebd.). Wenn die Lernmotivation allerdings gesteigert bleibt, kann das positive Auswirkungen auf das Interesse am Lerninhalt auswirken (ebd.). Durch eine Gewöhnung an das neue Medium, durch Studien mit mehreren Interventionen oder einer längeren Dauer kann der Effekt umgangen werden (Theyßen, 2014).

## **Embodied Learning**

Embodiment (deutsch: Verkörperung) im Kontext von VR wird als Zustand beschrieben, dass ein virtueller Körper von den Nutzenden wie der eigene reale genutzt werden kann und auch

als dieser angesehen wird (Gall et al., 2021). Der Begriff wird oft dafür genutzt, die Illusion einen virtuellen Körper zu besitzen zu beschreiben (Johnson-Glenberg, 2018). Beispielsweise, dass er innerhalb der virtuellen Umgebung einen menschlichen Körper sieht, wenn er an sich herunterschaut und dieser sich auch genauso bewegt und bewegen lässt, wie der eigene Körper in der Realität. Embodiment setzt sich aus den drei Komponenten Selflocation (deutsch: Selbstlokation), Ownership (deutsch: Besitz) und Agency (deutsch: Handlungsfähigkeit) zusammen (Roth, 2020). Embodiment ist eng verknüpft mit dem Embodied Learning (deutsch: verkörper-tes Lernen) (Hoffmann, 2021). In diesem Lernansatz wird vorausgesetzt, dass der Körper beim Lernen in Bewegung ist (Johnson-Glenberg, 2018). Dem Lernsignal soll so eine motorische Komponente hinzugefügt werden, die mehr neuronale Bahnen im Gehirn aktiviert, das Lernen stärkt und zu einer verbesserten Erinnerung führt (ebd.). Studien stützen diese Theorie und zeigten, dass Gesten und Aktionen während des Lernvorgangs das Gedächtnis stärken können (Broaders et al., 2007; Goldin-Meadow et al., 2001). Engelkamp und Zimmer (1994) fanden heraus, dass Teilnehmende sich Wörter besser merken konnten, wenn sie nicht nur Gesten, sondern Aufgaben dazu durchführten, als wenn sie die Wörter nur lasen oder anderen bei der Durchführung zusahen. Handlungen, die in VR durchgeführt werden, können mit dem Prinzip des Embodiments und des Embodied Learnings verknüpft werden. Das Embodiment wird auch mit dem bereits beschriebenen Konstrukt der Handlungsfähigkeit verbunden (Sato & Yasuda, 2005). Handlungsfähigkeit kann dazu beitragen, dass die Illusion des Embodiments verstärkt wird (Bertrand et al., 2018). Das Embodiment kann auch bei passiven Ereignissen ohne eigenständige Handlung auftreten (ebd.). Wie etwa der automatischen Zuweisung eines Körpers, wenn in eine virtuelle Welt durch eine VR-Brille eingetaucht wird. Um eine Lerneinheit als stark verkörpert ansehen zu können, muss körperliche Aktivität vorherrschen und es müssen die motorischen Neuronen kinästhetisch aktiviert werden (Johnson-Glenberg, 2018). Für VR und die neuen Möglichkeiten, die die Handsteuerung mit und ohne Controller ermöglicht, gibt es allerdings noch keine festen Designrichtlinien zur Umsetzung des Embodiments in Lerneinheiten (Johnson-Glenberg, 2018). Es kann geschlussfolgert werden, dass es für das Erzeugen von Präsenzerleben und der Bearbeitung der Lernstationen wichtig ist, Interaktionsmöglichkeiten zu schaffen und ein gewisses Maß an Verkörperung zu bieten. Die Erfahrung der Präsenz darf allerdings nicht durch schlechte Modellierung oder Animation des virtuellen Körpers negativ beeinflusst werden (Waltemate et al., 2018). Die Modellierung und Animation eines Körpers bergen die Schwierigkeiten, dass alle Teilnehmenden in einer realistischen VR-Lernumgebung eine Darstellung des eigenen Körpers erwarten könnten. Folglich müssten entweder verschiedene Körpermodelle für alle Geschlechter, Aussehen und Größen zur Auswahl stehen oder es müsste ein Anpassungsmodul dafür programmiert werden. Dies kann zwar die Präsenz und das Embodiment signifikant steigern (ebd.) benötigt aber einen sehr hohen Modellier- und Programmieraufwand.

Die Teilkomponente Selbstlokation (oder auch Selbstverortung) der Verkörperung ist für die Bildung des räumlichen Präsenzerlebens wichtig (Hartmann et al., 2005; Roth, 2020). Sie ist die Erfahrung, dass der eigene Körper (oder auch das Selbst) einen bestimmten Platz im Raum einnimmt und wird als einer der zentralen Aspekte des körperlichen Bewusstseins angesehen (Blanke, 2012). Sie wird zusammen mit den Handlungsmöglichkeiten direkt mit dem räumlichen Präsenzerleben in Verbindung gesetzt (Hartmann et al., 2015). Selbstlokation wird normalerweise innerhalb der physischen Grenzen des eigenen Körpers erlebt, kann aber auch durch

psychische Erkrankungen gestört werden (ebd.). Frühe Studien zeigten, dass die meisten Teilnehmenden ihr Selbst im Kopf oder im Rumpf verorteten, weshalb die Selbstlokation stark von der Ego-Perspektive beeinflusst wird (Nakul et al., 2020). Um die individuelle Position im Raum festlegen zu können, sind Informationen der eigenen Bewegung als auch aus der Umwelt notwendig (Barry & Burgess, 2014). Es gibt Hinweise aus den Kognitionswissenschaften, dass Menschen zur Bestimmung der Selbstlokation beide Arten von Informationen nutzen und diese nach Zuverlässigkeit gewichten (Nardini et al., 2008). Daher muss die gewählte VR-Hardware die körpereigenen Bewegungen so präzise wie möglich in der virtuellen Repräsentation wiedergeben. Ebenso müssen die Umweltinformationen aus der VR-Umgebung verlässlich und beständig sein. Bei einer realitätsnahen Umgebung setzt dies eine Umsetzung der uns bekannten Naturgesetze voraus, als auch die Einhaltung von realistischen Distanzen zwischen Objekten, die ebenso realistische Proportionen besitzen. Die Kamerahöhe der Ego-Perspektive im virtuellen Raum sollte dementsprechend auch der realen Körpergröße der Nutzenden entsprechen. Vorderer et al. (2004) operationalisieren das Präsenzerleben aus der Selbstlokation und den Handlungsmöglichkeiten. Handlungsmöglichkeiten sind in der Realität Interaktionen zwischen Menschen und Objekten. In der Virtualität werden dafür diese Beziehungen zwischen den Objekten und die dazugehörigen möglichen Interaktionen nachgebildet. Handlungen wie Greifen und Bewegen steigern die Motivation und tragen mit sofortigem Feedback zum Lernen bei (Tai et al., 2022). Interaktionsmöglichkeiten in VR wie die freie Erkundung visueller Elemente sowie deren Mobilität sind zentrale Aspekte für den Wissenserwerb (Pellas et al., 2020). Der Einsatz des Körpers in VR und die damit verbundenen Interaktionen mit der Umwelt tragen beim Embodied Learning dazu bei (Johnson-Glenberg, 2019), dass die Lernenden selbst aktiv sind und nicht passiv dabei zusehen, wie von anderen Lerngegenstände verändert werden (Kontra et al., 2015). In der Theorie der verkörperten Kognition, die eng mit Embodied Learning verknüpft ist, ist das räumliche Präsenzerleben eng mit dem erfolgreichen Handeln in der Umwelt als auch mit der mentalen Vorstellung der Möglichkeit des Handelns verbunden (Wirth et al., 2012). Dadurch wird ein Gefühl des In-der-Umwelt-Sein hervorgerufen (ebd.).

Werden die Handlungen nun durch technische Fehler oder Defekte gestört, wie beispielsweise kurzzeitigem Einfrieren des Sichtfeldes, kann es zu sogenannter Motion Sickness kommen. Motion Sickness ist ein Krankheitsphänomen, das sich durch Übelkeit, Brechreiz und Schwindel äußern kann. Die allgemein anerkannte Erklärung für dieses Phänomen nimmt an, dass ein sensorischer Konflikt zwischen wahrgenommenen und erwarteten Inputs (kinästhetisch, visuell, vestibulär) besteht, welcher vom Gehirn nicht richtig verarbeitet werden kann (Golding, 2016). Wichtig hierbei ist, dass die Intensität des physischen Reizes nicht mit dem Grad der Schwere der Motion Sickness zusammenhängt (Golding, 2006). Motion Sickness kann demnach in verschiedenen Kontexten auftreten, in denen intensive physische Reize vorherrschen oder diese nur simuliert, aber nicht real erlebt werden. Unterschieden wird dabei zum Beispiel in Land, See und Luft, aber auch Weltraum und Optokinetik (Golding, 2016). Die in VR auftretende Motion Sickness wird dem Kontext der Optokinetik zugeordnet, da die Person hierbei keinen physischen Reizen ausgesetzt ist (ebd.). Es hängt von vielen unterschiedlichen Faktoren ab, ob dieses Krankheitsphänomen auftritt. Diese können zum Beispiel physiologischer Art wie Puls und Blutdruck, aber auch die Erfahrung im Umgang mit VR-Systemen oder das Design der virtuellen Welt sein (Chattha et al., 2020). Um Motion Sickness im Endprodukt und während des Embodiments schon während des Designprozesses vorzubeugen, bilden die erzeugten

Bilder pro Sekunde (frames per second, kurz FPS), die über die VR-Brille wahrgenommen werden, einen zentralen Faktor. Zhang (2020) fand heraus, dass eine niedrige Bildwiederholungsrate signifikant mit dem Schwindelgefühl als auch den Kopfschmerzen der Motion Sickness zusammenhängt. Es wird demnach empfohlen, dass wenn die genutzte Hardware für die Darstellung der virtuellen Welt zu schlecht ist, die Qualität der 3-D-Assets zu reduzieren und damit die FPS zu steigern, um eine Verzögerung zwischen Realität und Darstellung aufgrund von Ladeproblemen zu vermeiden (ebd.). Ebenso sollten die FPS und die Bildwiederholungsrate des Bildschirms in der VR-Brille aufeinander angepasst sein (ebd.).

Wenn alles problemfrei funktioniert und das subjektive Gefühl sowie die Möglichkeit des selbstständigen Handelns erzeugt wird, kann es mit Lehrformaten verknüpft werden, die die Lernenden die Vorteile der VR-Lernumgebung voll ausschöpfen lassen. Ein Beispiel hierfür ist das entdeckende Lernen.

### **Entdeckendes Lernen**

Als zentrale Elemente des entdeckenden Lernens gelten unter anderem die Eigenaktivität der Lernenden als Voraussetzung für das Lernen, die weitgehende Selbstständigkeit der Lernenden im Lernprozess und ein komplexes Problem als Lernanlass, das zu Fragen anregt (Forkel, 2009). Bei entdeckendem Lernen steht ein Ereignis oder eine Frage im Vordergrund, das durch die Lehrperson eingeführt wird (Woolfolk, 2014). Daraufhin formulieren Lernende selbstständig Hypothesen, um dieses Ereignis oder diese Frage zu erklären (ebd.). Anschließend müssen Erkenntnisse gesammelt werden, um Schlussfolgerungen zu den eigenen Hypothesen ziehen zu können und zu reflektieren, ob das Ausgangsereignis damit erklärt ist (ebd.). In der virtuellen Realität kann das entdeckende Lernen in Lernumgebungen eingesetzt werden, die für bestimmte Lernziele optimiert sind (Johnson-Glenberg, 2019). Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten in VR, die auch die Gesetze der Realität überschreiten können, stehen den Gestaltern von Lernstationen nahezu unbegrenzte Möglichkeiten zur Verfügung. Das zeigt auf, dass es wichtig ist, die Lernenden in der fertigen Lernumgebung nicht völlig auf sich allein gestellt zu lassen, obwohl dies in diesem Lehrformat eigentlich gewünscht ist (Woolfolk, 2014). Ein gewisses Maß an Führung durch die Lerninhalte, das die Lernenden nicht zu sehr an die Hand nimmt und ihnen genügend Freiraum zur Erkundung lässt, wird von Johnson-Glenberg (2019) in der VR als sinnvoll erachtet, sofern bei den Lernenden wenig Vorwissen im Umgang mit VR oder dem Thema vorhanden ist. Da VR im Schulalltag noch kaum eingesetzt wird, wird davon ausgegangen, dass kein bis wenig Vorwissen im Umgang mit der Technologie, der neuen virtuellen Lernumgebung sowie dem darin aufbereiteten Lernstoff vorhanden ist. Eine gewisse Begleitung durch die Lernstationen ist daher notwendig. Mit voranschreitendem und routinierter Einsatz im Schulunterricht könnte diese Art der Führung für zukünftige Lernumgebungen entfallen.

### **Konstruktivistische Lerntheorie**

Entdeckendes Lernen beinhaltet überwiegend Prinzipien, die die aktive Rolle des Lernenden in den Vordergrund stellen (Forkel, 2009). Es basiert auf der Idee, dass Lernende Zusammenhänge, die sie selbst entdeckt haben, besser verinnerlichen (ebd.). Dies hat viele Überschneidungspunkte mit konstruktivistischen Lerntheorien. Johnson-Glenberg (2019) postuliert, dass

VR-Lernumgebungen im MINT-Bereich auf darauf basieren sollten, da sie viele Voraussetzungen dafür erfüllen. Piaget (1959) beschreibt, dass Wissensstrukturen von Lernenden durch forschende Interaktionen mit der Umwelt gebildet werden. In VR wird es ermöglicht, sich bei solchen zielgerichteten, forschenden Aktivitäten präsent zu fühlen (Johnson-Glenberg, 2019). Da es keine einheitliche konstruktivistische Lerntheorie gibt, wurden zwei Kernideen extrahiert, über die sich die meisten Konstruktivisten einig sind (Woolfolk, 2014). Zum einen konstruieren sich die Lerner aktiv ihr eigenes Wissen, zum anderen können soziale Interaktionen die Wissenskonstruktion fördern (ebd.). Bei der eigenen Wissenskonstruktion werden vorhandene Informationen und Ressourcen genutzt, um individuelle mentale Modelle und Problemlösestrategien aufzubauen und zu optimieren (ebd.). Ein weiterer Grundsatz besagt, dass Lernen nicht isoliert, sondern in eine realitätsnahe, relevante und komplexe Lernsituation eingebettet werden soll (ebd.). Durch die Einbettung von Lerninhalten in einen realitätsnahen Nachbau eines außerschulischen Lernorts in VR, der ein für den Inhalt relevantes Setting darstellt, wird dies gewährleistet. Die nur in VR mögliche Manipulation der Umgebung sowie die direkte Verknüpfung von Umgebung und Lernstoff ermöglicht ein hohes Maß an möglicher Komplexität. Innerhalb dieser komplexen Lernumgebungen kann eine dosierte Unterstützung (Scaffolding) angeboten werden (ebd.). Diese können auf unterschiedliche Weise eingebracht werden: Teilziele definieren, Fortschritt der Lernenden beobachten sowie weitere Ressourcen zur Verfügung stellen (ebd.). In VR kann ein breites Spektrum an unterschiedlichen Darstellungsmöglichkeiten von Informationen genutzt werden und dadurch ein elaborierteres Scaffolding stattfinden. Hilfestellungen können beispielsweise durch einen sequenziellen Aufbau der Lernstationen und/oder den Einsatz von programmierten Markern bedarfs- und situationsgerecht eingefügt werden. Die Lernmaterialien, die angeboten werden, können zudem der konstruktivistischen Forderung folgen, dass vielfältige Sichtweisen und Repräsentationsformen genutzt werden sollen, um die Inhalte darzustellen. Möglich sind zum Beispiel die Formate Bild, Video, 3-D-Animation, 3-D-Modell sowie Text und Audio. Die Forderung nach lebensnahen Inhalten (ebd.) kann ebenfalls erfüllt werden, da die zu erarbeitenden Lerninhalte in ein realitätsnahes Setting eingearbeitet und interaktiv damit verbunden werden können. Wenn sich für das Entdeckende Lernen entschieden wird, können Lernstationen und -inhalte im praktischen Schulunterricht beispielsweise gleichzeitig zur selbstständigen Bearbeitung durch die Lernenden verfügbar gemacht werden. Es ist auch denkbar, Lernstationen zu konzipieren, die einzeln in bestimmten Unterrichtsphasen bereitgestellt werden.

Der soziale Aspekt des Konstruktivismus, nämlich dass die VR-Lernumgebung von mehreren Personen gleichzeitig genutzt werden können, erfordert eine komplexe Serverinfrastruktur als auch eine aufwändige Programmierung. Obwohl der soziale Aspekt im Konstruktivismus eine zentrale Rolle spielt, kann er in den Anfangsphasen von VR-Lernumgebungen aufgrund des hohen Aufwands nur schwer und mit hohen finanziellen Ressourcen umgesetzt werden. Eine Auslagerung dieses Aspekts auf den realweltlichen Unterricht, beispielsweise bei der Nachbesprechung der VR-Inhalte, ist daher erst mal empfehlenswerter.

### **Auswirkungen auf den Lernprozess durch Lernen in VR**

Eine Vielzahl an Studien hat sich bereits damit beschäftigt herauszufinden, welche Vorteile das Lernen in VR haben kann sowie warum Präsenz für einen erfolgreichen Lernvorgang in immersiven virtuellen Umgebungen und damit im I-Learning maßgeblich ist. Roy und

Schlemminger (2014) haben gezeigt, dass Präsenzerleben eine stärkere kognitive und sinnliche Eingebundenheit (Involvement) erwirken kann und dass dadurch vermutlich durch das Hörverständnis die Gedächtnisleistung gefördert wird. Lin et al. (2002) fanden heraus, dass Präsenz einen positiven Effekt auf die Verbindung von Gedächtnisstrukturen mit Formen, Farben, relativen Orten, relativen Größen und Ereignisabläufen in virtuellen Umgebungen haben kann. Mikropoulos und Bellou (2006) führen an, dass die positiven Lernergebnisse maßgeblich unter anderem durch freie Navigation, eine First-Person-Sicht, Autonomie und Präsenz beeinflusst werden. Chavez & Bayona (2018) führten in einer Metastudie eine systematische und umfassende Literaturrecherche der Jahre von 1999 bis 2017 durch, in der sie unter anderem untersuchten, welche positiven Auswirkungen der Einsatz von VR auf den Lernprozess hat. Die nach strengen Kriterien ausgesuchten Publikationen umfassen die Bereiche Bildung, Medizin, IT, Psychologie, Handel, Industrie und Bergbau. Genutzt wurden hierfür digitale Bibliotheken (beispielsweise IEEE Xplore und PsycINFO), die mit Datenbankabfragen nach Publikationen durchsucht wurden. Kriterien hierfür waren beispielsweise die Nutzung von virtueller Realität in der Bildung, empirischer Evaluation, Verfügbarkeit von Primärstudien sowie positiver Einfluss auf den Lernprozess. Aus insgesamt 4060 Publikationen zu VR erfüllten 663 die gewählten Kriterien, von denen wiederum 30 nach manueller Sichtung der Publizierenden die Anforderungen für die gewählten Forschungsfragen erfüllten. Die Kriterien waren unter anderem, ob die Publizierenden die Qualität/Validität der eingeschlossenen Studien bewertet haben und ob die Datengrundlage der Publikationen angemessen beschrieben wurde. Zusätzlich zu den positiven Effekten auf den Lernprozess, den die 30 ausgewählten Publikationen nachweisen, verweisen die Publikationen auf noch weitere Vorteile. Die Lernergebnisse können verbessert werden (Mikropoulos & Bellou, 2006), es werden realitätsnahe Erfahrungen ermöglicht (Hui-Zhen & Zong-Fa, 2014), das Interesse im Vergleich zu traditionell-akademischem Lernen kann verstärkt werden (Chandramouli et al., 2014), Fähigkeiten können besser trainiert und erworben (Ruddle et al., 2013) sowie die intrinsische Motivation gesteigert werden (Graaff, 2008). In einer Studie von Rupp et al. (2016) wurden signifikante Effekte zum richtigen Abruf von auditiven als auch visuellen Erinnerungen aus immersiven digitalen Umgebungen festgestellt. Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass es eine Vielzahl an Studien aus verschiedenen Fachbereichen gibt, die positive Lerneffekte nachweisen. Lernen in VR ist bereits ein breit aufgestelltes und schnell voranschreitendes Forschungsfeld.

### **Konzeptionshinweise zu VR-Lernumgebungen**

Im Gegensatz zur schon etablierteren Forschung wie Lernen in immersiven Umgebungen und VR funktionieren kann, sind Gestaltungsprinzipien, wie immersive VR-Lernumgebungen für die Schulpraxis gestaltet werden sollten, nicht im Fokus der Forschung.

*„The use of VR in education is so new, and its affordances are of such a multitude, that design guidelines solely for education in VR have not yet been published“*

(Johnson-Glenberg, 2018, S. 7).

Dies zeigt sehr gut den Stand der Forschung auf, der zu diesem Zeitpunkt für Gestaltungsprinzipien für VR-Lernumgebungen vorherrschte: Es gab so gut wie keine wissenschaftliche Auseinandersetzung damit, wie VR-Lernumgebungen im Bildungsbereich gestaltet werden müssen, um erfolgreich in der Schulpraxis eingesetzt werden zu können. Kurz darauf wurden von Johnson-Glenberg (2019) allgemeine Hinweise zu Lernen in VR zusammengetragen.



Allerdings sind diese nicht auf die (deutsche) Schulpraxis bezogen und geben somit keine konkreten Gestaltungshinweise, sondern bilden eher generelle Richtlinien, die bei der Erstellung helfen können. Nachfolgende Richtlinien sind von Johnson-Glenberg (2019) adaptiert und werden in diesem Projekt zur Gestaltung der VR-Lernumgebung berücksichtigt:

1. Erleichtern Sie die kognitive Anstrengung.

Arbeitsschritte sollten aufbauend eingeführt werden, sodass eine Überforderung durch zu komplexe Durchführungen vermieden werden kann.

2. Verwenden Sie geführte Erkundung.

Lernende sollten mithilfe von Wegweisern, blinkenden Objekten und eingeschränkten Wahlmöglichkeiten in der Umgebung angeleitet werden. Freie Erkundung hat sich als Unterrichts-konstrukt für den MINT-Unterricht in einer Untersuchung von Kirschner et al. (2006) nicht bewährt.

3. Geben Sie sofortiges, umsetzbares Feedback.

Um die kognitiven Anpassungen in das mentale Modell der Lernenden zu integrieren, sollten Feedbackstrukturen in die Lernumgebung eingebaut werden.

4. Testen Sie häufig mit der richtigen Gruppe.

Während des Designprozesses ist es wichtig, das Produkt häufig mit der richtigen Zielgruppe zu testen, um das passende Feedback zu erhalten und das Design dementsprechend anpassen zu können. Das Testen durch Entwickelnde wird hier explizit ausgeschlossen, da sich diese durch die häufige Nutzung der VR-Lernumgebung anders darin verhalten als die Endnutzenden.

5. Bauen Sie Gelegenheiten zur Reflexion ein.

Zurzeit der Publikation gab es noch keine feste Gestaltungsrichtlinie, wie dies umzusetzen ist. Möglichkeiten zur Reflexion sollten aber eingebaut werden, da es das mentale Modell vervollständigen kann.

6. Verwenden Sie die Handsteuerung für aktives, körperbasiertes Lernen.

Es sollten physische, kinästhetische Handlungen eingebaut werden, die den Inhalt beeinflussen. Aktives Lernen steigert die Noten im MINT-Unterricht nachweislich um bis zu 20 % (Waldrop, 2015).

Bei der Planung und Durchführung konnten nur die bis zum Start der Forschung publizierten Gestaltungsprinzipien berücksichtigt werden.

### **2.3 Forschungsmethodologie**

In der nun folgenden Forschungsmethodologie wird die Herangehensweise erläutert, mit der die Forschungsfragen beantwortet werden sollen. Methodologie kann als „Nachdenken über den Weg“ oder auch Methodentheorie übersetzt werden (Sturm, 2010). Sie umfasst die zentralen Arbeitsschritte, mit denen das Forschungsprojekt durchgeführt wird. Diese beinhalten die Formulierung von Kriterien, die bei der Gestaltung von VR-Lernumgebungen beachtet werden müssen, ebenso wie die Erläuterung der gewählten Forschungsmethodik.

Johnson-Glenberg (2018) zeigt auf, dass noch keine Gestaltungsprinzipien zur Erstellung von VR-Lernumgebungen existierten. Anhand der theoretischen Rahmung wurden Kriterien identifiziert, die für die Erforschung und Formulierung von solchen Gestaltungsprinzipien

berücksichtigt werden sollten. Zunächst können allgemeine Hinweise zur Konzeption von VR-Lernumgebungen aus der Publikation von Johnson-Glenberg (2019) entnommen werden.

- Erleichtern Sie die kognitive Anstrengung.
- Verwenden Sie geführte Erkundung.
- Geben Sie sofortiges, umsetzbares Feedback.
- Testen Sie häufig mit der richtigen Gruppe.
- Bauen Sie Gelegenheiten zur Reflexion ein.
- Verwenden Sie die Handsteuerung für aktives, körperbasiertes Lernen.

Johnson-Glenberg (ebd.) beschreibt zudem, dass VR viele Vorteile mit sich bringt, die die konstruktivistische Lerntheorie fordert. Ein vertiefender Blick in den Konstruktivismus hat dies bestätigt (Woolfolk, 2014). Folgende Kriterien können daraus abgeleitet werden:

- Lerninhalte sollen in komplexe, relevante und realitätsnahe Lernsituationen eingebettet werden.
- Lerninhalte und Hilfsmaterialien sollen situations- und bedarfsgerecht bereitgestellt werden.
- Lernmaterialien sollen vielfältig und in unterschiedlichen Darstellungsformen dargestellt werden.
- Soziale Interaktionen zur Ver- bzw. Bearbeitung der Lerninhalte, sofern technisch und finanziell möglich, sollen ermöglicht werden.

Aus der interdisziplinären Theorie konnten die folgenden Kriterien zu Lernen in VR und den damit assoziierten Variablen extrahiert werden.

- Räumliches Präsenzerleben spielt eine zentrale Rolle beim Lernen in VR und gilt als entscheidender Faktor (Hofer, 2013). Es sollte maximiert werden, um die positiven Effekte auf das Lernen bereitstellen zu können.
- Der kognitive Prozess, der räumliches Präsenzerleben ermöglicht, kann stark von Immersion und der dazugehörigen Hard- und Software beeinflusst werden (Cummings & Bailenson, 2016). State of the Art Technology sollte zur Programmierung und Durchführung genutzt werden, um die bestmöglichen immersiven Reize zu produzieren.
- Lernen in VR, sogenanntes Immersive Learning, wird maßgeblich von Immersion, Präsenz, Motivation sowie kognitiven und emotionalen Faktoren beeinflusst (Dengel & Mägdefrau, 2018; Makransky & Petersen, 2021). Bei der Entwicklung von Lernstationen sollte darauf geachtet werden, dass für den bereitgestellten Lernstoff die Vorteile von VR genutzt und die Teilnehmenden motiviert werden können. Die kognitiven Hürden zur Bewältigung der Lernaufgaben in VR müssen angemessen sein.
- Lernen in VR wird von Embodiment beeinflusst und es gibt noch keine Designrichtlinien dafür (Johnson-Glenberg, 2018). Wenn Verkörperung genutzt wird, sollte auf eine angemessene Umsetzung geachtet werden, um keine negativen Einflüsse auf das Präsenzerleben auszulösen.
- Annahmen und Erwartungen der Zielgruppe an die Umgebung sollten bei der Umsetzung einbezogen werden, um Realismus und damit zusammenhängende Authentizität zu fördern (Gilbert, 2016).
- Motion Sickness muss vermieden werden (Chattha et al., 2020).

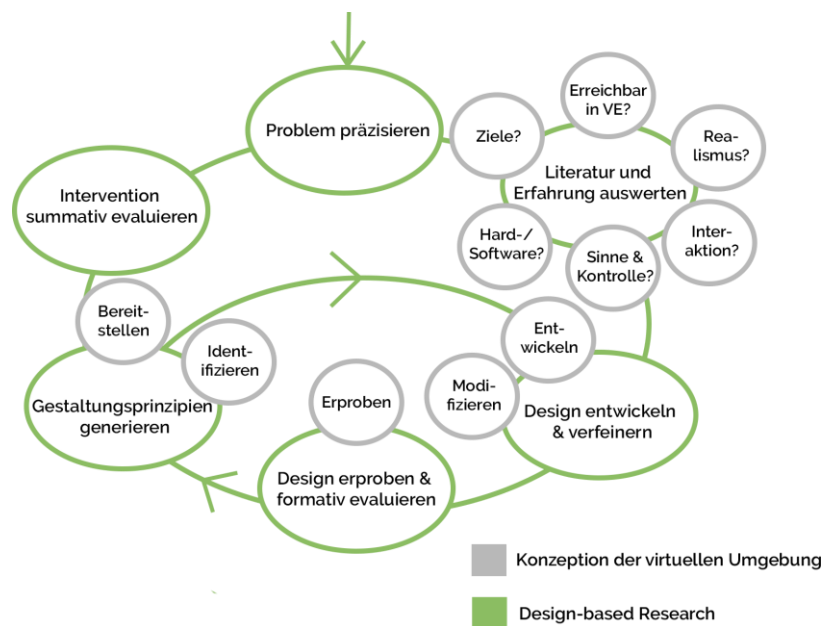
- Auditive Reize sollten durch Soundscapes integriert werden und können das individuelle Erleben der Landschaft beeinflussen (Edler et al., 2019).
- Informationen der eigenen Bewegung und der Umwelt sind notwendig, um Selbstlokation zu fördern (Barry & Burgess, 2014; Nardini et al., 2008). Es sollte ausreichend Bewegungsfreiheit vorhanden sein, um das Bewegungspotential zur Sammlung solcher Informationen zu ermöglichen.

Durch die Beachtung dieser Kriterien kann die Konzeption und Evaluation einer VR-Lernumgebung gelingen. Es ist allerdings wichtig zu erwähnen, dass die Einflussfaktoren, die auf das räumliche Präsenzerleben in VR-Lernumgebungen wirken, nicht gänzlich geklärt sind, da es sich um eine neue, innovative Lehrmethode handelt die nicht gänzlich erforscht ist (Dengel & Mägdefrau, 2018). Um die gesammelten Kriterien der unterschiedlichen Forschungsfelder in einem Projekt zu vereinen und daraus Gestaltungsprinzipien zu generieren, bedarf es eines Forschungsformats, das es ermöglicht, mit einem breiten methodischen Spektrum zu arbeiten.

### **Design-Based Research**

Der Design-Based Research (DBR) Ansatz wird gewählt, da er ein innovationsorientiertes Forschungsdesign darstellt und sich für Beforschung sowie die Bewältigung von Praxisproblemen im Kontext der Bildung eignet (Goff & Getenet, 2017; Lehrmann et al., 2022). Wie in der Ausgangslage bereits analysiert, erfordern die Forschungsfragen eine Methodik, die zur Generierung von Gestaltungsprinzipien geeignet ist. Obwohl Doktorierenden generell abgeraten wird, diese Forschungsmethodik aufgrund ihres möglichen Umfangs zu nutzen (ebd.), ergab die Untersuchung von Goff & Getenet (2017), dass eine Adoption in kürzeren und intensiveren Studien möglich ist und sie mit diesem Ansatz in der Lage sind, einen echten Wandel im Bildungskontext herbeizuführen. DBR ermöglicht, die Vielzahl an Facetten des Untersuchungsgegenstandes und -kontextes zu berücksichtigen (M. Schäfer & Diezemann, 2017). In diesem Forschungsprojekt muss die virtuelle Umgebung zielgerichtet, kontinuierlich und kontrolliert nach Erkenntnisgewinnen aktualisiert werden können. DBR hebt den Innovationscharakter der wissenschaftlichen Zielstellung unter Berücksichtigung der Lehr-Lernforschung stärker hervor als andere klassische Formate der Evaluationsforschung (M. Schäfer & Diezemann, 2017). Reinmann (2005) stellt dar, dass der DBR-Forschungsansatz in der Lehr-Lernforschung sowie bei der Entwicklung von Unterricht dafür geeignet ist, innovative Formate zu kreieren, testen und zu etablieren. Er vereint und integriert die Aspekte Entwicklung und Forschung sowie die Akteure innerhalb dieses komplexen Prozesses. Die designbasierte Forschung stellt keine spezifischen Anforderungen an die Form, die die Lehrmittel annehmen werden und auch nicht, wie diese evaluiert werden (Anderson & Shattuck, 2012; Bell, 2004). Ziel von DBR sind allgemeingültige Gestaltungsprinzipien, die die Entwicklung und Implementierung der untersuchten Innovationen zukünftiger Lehrmittel leiten (Edelson, 2002). Richey und Klein (2007) unterscheiden zwischen DBR-Forschung, die sich auf Lehrprodukte und -tools konzentriert, sowie Forschung zu Prozessmodellen. Für DBR gibt es bereits zahlreiche Prozessmodelle, die aber auf einen generischen Prozessablauf zurückgeführt werden (McKenney & Reeves, 2012). Dieser ist in die drei Kernphasen Untersuchung/Analyse, Entwurf/Prototyping und Bewertung/Rückblick einzuteilen (ebd.). Werden diese Prinzipien in den Ablauf eines Forschungsvorhabens übersetzt, besteht aus dieser sinnhaft aus Design → Erprobung → Evaluation → und Re-Design (Reinmann, 2017). Dieser Ablauf kann theorie- und situationsspezifisch an das jeweilige

Forschungsvorhaben angepasst werden (F. Wang & Hannafin, 2005). Als Grundlage wird das Sechs-Phasen-Modell nach Euler (2014) herangezogen. Eulers Modell fokussiert sich auf die Entwicklung von Lehrprodukten, die aus der Kooperation von Wissenschaft und Praxis entstehen (Dilger & Euler, 2017). Durch kleine Entwicklungsschritte, iterative Mikrozyklen, die in einen übergeordneten Makrozyklus eingebettet sind und viele Prototypen, die somit untersucht werden können, ermöglicht es die theoriegeleitete Entwicklung, Erprobung und Evaluation sowie eine sukzessive Optimierung der Lernumgebung (Burda-Zoyke, 2017). Dieses Modell bedarf zum Designen einer VR-Lernumgebung allerdings einer Modifikation. Abbildung 4 zeigt das Sechs-Phasen-Modell kombiniert mit den Gestaltungshinweisen für eine VR Lernumgebung, welche aus dem Ingenieurwesen nach Vergara et al. (2017) entlehnt sind.



**Abbildung 4: Sechs-Phasen-Modell von Euler (2014) erweitert um Designschritte nach Vergara, Rubio und Lorenzo (2017).**

Es ist sehr schwierig, mehrere Iterationen, Konzeptionen und solide Forschung in weniger als zwei Jahren durchzuführen, insbesondere wenn es sich um ein Projekt handelt, das von einer oder nur wenigen Personen bearbeitet wird (McKenney & Reeves, 2012). Die Ausarbeitung eines exakten Zeitplans dieses Forschungsvorhabens ist nicht machbar, da die aufwändige Programmierarbeit nur von zwei Personen getragen wird und es nicht planbar ist, welche Änderungen und Ergänzungen zwischen den Mikrozyklen stattfinden werden. Innerhalb dieses Makrozyklus werden die verschiedenen Mikrozyklen iterierend durchgeführt, um einzelne Designschritte zu evaluieren und zu verbessern. Auch bei einem Mikrozyklus (MZ) ist die Entwicklung im engeren Sinne mit Teilprozessen wie Framing, Scripting und Prototyping iterativ, so dass keine zeitlich lineare Abfolge garantiert werden kann.

## Mikrozyklen

Der vorgestellte Makrozyklus beinhaltet eine unbestimmte Anzahl an Mikrozyklen, die iterativ durchlaufen werden können. Hierfür wurde ein eigenes Mikrozyklus-Konzept (siehe Abbildung 5) auf Basis der iterativen Mikrozyklen in Abbildung 4 entworfen und eingesetzt. Zunächst wird darauf geachtet, dass Theorien, Forschungslücken und Good Practices der



immersive Learning, zeigt, dass eine Vielzahl an Variablen für den möglichen Lernerfolg in VR verantwortlich ist (Makransky & Petersen, 2021). Um die VR-Lernumgebung kleinschrittig zu untersuchen und Gestaltungsprinzipien zu formulieren, wurden deshalb relevante Komponenten anhand der Kriterien identifiziert. Diese Komponenten sind der Realismus der Umgebung (Beispielsvariable: Authentizität), der mögliche Bewegungsradius der Teilnehmenden (Beispielsvariable: Selbstlokation), realitätsnahe Umgebungsgeräusche (Beispielsvariable: Soundscapes) sowie die Lernstationen (Beispielsvariable: Involvement). Sie sind elementar für das Design der Lerninhalte und den technischen Aufbau einer virtuellen Lernumgebung. Aus den Kriterien und der dazugehörigen Theorie lässt sich schließen, dass sie auf das räumliche Präsenzerleben, das als maßgeblich für den Lernerfolg angesehen wird, einwirken. In der folgenden Darstellung erfolgt eine Zuordnung der Komponenten zu den Mikrozyklen.



**Abbildung 6: Darstellung der Reihenfolge der Mikrozyklen.**

Die Mikrozyklen wurden innerhalb des Makrozyklus nacheinander durchlaufen. So sollte durch die isolierte Betrachtung Gestaltungsprinzipien formuliert und Forschungsfrage zwei beantwortet werden. Insgesamt wurden sieben Mikrozyklen geplant, die von null bis sechs durchnummeriert wurden. Der Start bei null wurde so gewählt, da dieser Mikrozyklus nicht die gestaltete VR-Umgebung evaluierte, sondern eine initiale Einführung von VR darstellte, die einen möglichen Neuigkeitseffekt erfassen sollte. Die Zyklen eins bis sechs wurden aufbauend aufeinander konzipiert, sodass von der lautlosen, rein optischen Grundfläche über den Bewegungsradius, das Hinzufügen von Soundscapes schließlich zu den Lernstationen vorangeschritten wurde. Durch das gewählte DBR-Format war es möglich die Zyklen iterativ zu durchlaufen und basierend auf den Ergebnissen Änderungen der Umgebung vorzunehmen.

Diese Aufteilung verhalf dazu mit zunehmenden Bewegungs- und Interaktionsmöglichkeiten sowie dem Hinzufügen weiterer Reize verschiedene Faktoren verstärkt anzusprechen. Eine schrittweise empirisch kontrollierte Steigerung des räumlichen Präsenzerlebens konnte so stattfinden. Es ermöglichte zudem die isolierte Betrachtung der einzelnen Komponenten und deren Einfluss auf das räumliche Präsenzerleben. So konnten diese Faktoren, die wichtige Designgrundlagen für die Planung von VR-Lernumgebungen im praktischen Schulunterricht darstellen, adäquat untersucht sowie evaluiert werden. Das übergeordnete Ziel war es, ein höchstmögliches Präsenzerleben zu erzeugen, um die best-möglichen Bedingungen für immersives Lernen in VR zu schaffen.

Folgende Kriterien wurden mit dieser Einteilung beachtet:

- Testen Sie häufig mit der richtigen Gruppe.
- Räumliches Präsenzerleben spielt eine zentrale Rolle beim Lernen in VR und gilt als entscheidender Faktor (Hofer, 2013). Es sollte maximiert werden, um die positiven Effekte auf das Lernen bereitstellen zu können.

Nachfolgend werden die Konzeptionen sowie Durchführungen der einzelnen Mikrozyklen genauer betrachtet.

### **Mikrozyklus 0: Demo & Neuigkeitseffekt**

Um die Teilnehmenden an die Nutzung von VR zu gewöhnen und einen möglichen Neuigkeitseffekt abzumildern, wurde die Einführungsdemo der Oculus Quest genutzt. Sie durchliefen einzeln die interaktive Simulation, um die Steuerung der VR-Brille und den Umgang mit den Controllern zu erlernen. Die Demo bestand aus einer auditiv geführten Anleitung der Controllerfunktionen in einem Raum mit verschiedenen Gegenständen und Interaktionsmöglichkeiten. Der Bewegungsradius wurde auf 2x2 Meter gesetzt, da dieser den minimalen Radius darstellt, bei der Nutzung der VR-Brille von der Systemsoftware empfohlen wird.

### **Mikrozyklus 1: Realismus**

Folgendes Kriterium wurde in diesem Zyklus beachtet:

- Annahmen und Erwartungen der Zielgruppe an die Umgebung sollten bei der Umsetzung einbezogen werden, um Realismus und damit zusammenhängende Authentizität zu fördern (Gilbert, 2016).

Mikrozyklus eins konzentrierte sich auf die realitätsnahe Nachbildung der Umgebung der ersten Version der VR-Umgebung mit einem starken Fokus auf den Realismus. Erhoben wurde in einem Pausenraum direkt neben den Klassenzimmern der Schulklassen. Jeweils zwei Teilnehmende konnten gleichzeitig in die VR-Lernumgebung eintauchen. Der empfohlene Radius von 2x2 Metern aus Mikrozyklus null wurde beibehalten. Die Bewegungsbeschränkung wurde durch eine Einstellung der Oculus Quest VR-Brille bewerkstelligt. Es wurde vor dem Eintauchen der Teilnehmenden in die VR-Umgebung vorbereitend eine 2x2 Meter lange, virtuelle Mauer gezogen. Sobald sie sich dieser näherten, wurde ein blaues Gitternetz sichtbar und ihnen damit die Grenze des Bereichs aufgezeigt. Bewegten sie sich darüber hinaus, verschwand die VR-Umgebung und ihre reale Umgebung wurde über die an der VR-Brille angebrachten Kameras eingeblendet. Interaktionen waren in diesem Zyklus nicht geplant. Dieser Zyklus untersuchte den Realismus und die damit verbundene Authentizität der Umgebung und das damit zusammenhängende Präsenzerleben. Ziel war es, einen höchstmöglichen Realismus zu erzeugen, um ein starkes Präsenzerleben der Teilnehmenden hervorzurufen.





Abbildung 7: Erhebungsraum in dem MZ null, MZ eins und die 2x2 Meter Gruppe von MZ zwei durchgeführt wurden.

## Mikrozyklus 2: Bewegungsradius

Folgendes Kriterium wurde in diesem Zyklus beachtet:

- Informationen der eigenen Bewegung und der Umwelt sind notwendig, um Selbstlokation zu fördern (Barry & Burgess, 2014; Nardini et al., 2008). Es sollte ausreichend Bewegungsfreiheit vorhanden sein, um das Bewegungspotential zur Sammlung solcher Informationen zu ermöglichen.

In Mikrozyklus zwei stand die Bewegungsreichweite im Fokus. Zu beachten galt, dass drei Lernstationen fußläufig in der VR-Lernumgebung erreichbar und bearbeitbar sein müssen. Gleichzeitig war es wichtig, dass die Raumverhältnisse für eine Schule bewältigbar sein mussten. Hierfür wurden drei Gruppen eingeteilt, die unterschiedliche Bewegungsradien erhielten. Der Radius der ersten Gruppe wurde auf 2x2 Meter festgelegt, da es minimale Bewegung ermöglicht, ohne die Teilnehmenden komplett einzuschränken. Die zweite Gruppe erhielt 4x4 und die dritte 6x6 Meter. Die Bewegungsradien orientierten sich an der durchschnittlichen Klassengröße von 24.3 Lernenden in Rheinland-Pfalz (Knorr & Schröder, 2020) in Bezug zur genormten Sporthallengröße der DIN 18032-1 (Büngert et al., 2016) und unter der Prämisse, dass alle Lernenden gleichzeitig in die VR eintauchen können. Nachfolgend wird eine Zuordnung der Bewegungsradien zum möglichen Hallentyp vorgenommen.

Tabelle 1: Din-genormte Flächen von Schulsportthallen in Relation zu den gewählten Bewegungsradien.

Radius	Person	Klassenverband	Hallenbezeichnung	DIN 18032-1	Hallengröße (m <sup>2</sup> )
2x2 m	4 m <sup>2</sup>	97,2 m <sup>2</sup>	Einzelhalle	15 m x 27 m	405 m <sup>2</sup>
4x4 m	16 m <sup>2</sup>	388,8 m <sup>2</sup>	Einzelhalle	15 m x 27 m	405 m <sup>2</sup>
6x6 m	36 m <sup>2</sup>	874,8 m <sup>2</sup>	Zweifachhalle	22 m x 44 m	968m <sup>2</sup>



Die Tabelle eins zeigt die Bewegungsradien der eingeteilten Gruppen, den daraus errechneten Quadratmeterbedarf einer Einzelperson als auch den des ganzen Klassenverbands. Diesen sind die passenden Hallenbezeichnungen zugeordnet, ebenso wie die DIN-Normgrößen und die daraus resultierende Quadratmeterzahl der Hallen. Es kann der Quadratmeterbedarf des Klassenverbandes direkt mit der Hallengröße in Quadratmetern abgeglichen werden. Es ist erkennbar, dass die Radien 2x2 und 4x4 Meter in einer Einzelhalle für jede Schule zu bewältigen sind. Für einen Bewegungsradius von 6x6 Meter ist eine Zweifachhalle notwendig und somit möglicherweise nicht mehr für jede Schule realisierbar. Sollte die Klassengröße den Durchschnitt übersteigen, wäre auch für den Radius von 4x4 Meter eine Zweifachhalle empfehlenswert oder ein Unterrichtsdesign, das nicht vorsieht, alle Teilnehmenden gleichzeitig in der VR arbeiten zu lassen. Beispielsweise würde sich Stationsarbeit mit integrierten Nicht-VR-Stationen anbieten, sodass ein Wechsel der verfügbaren VR-Brillen ermöglicht wird.

Nach Beenden dieses Zyklus wurde ein Bewegungsradius anhand der empirischen Ergebnisse ausgewählt. Mit diesem Radius wurden alle weiterführenden Zyklen durchgeführt. Es wurde so gewährleistet, dass egal welcher Radius sich durchsetzen sollte, die Durchführung der Lernstationen möglich ist. Bei einem Radius von 6x6 Meter wäre es möglich, alle drei Stationen direkt zum Start innerhalb des Bewegungsradius sichtbar anzuordnen. Sie wären bequem und mit viel Platz dazwischen erreichbar und bearbeitbar. Eine ähnliche Anordnung wäre auch mit einem Radius von 4x4 Meter möglich gewesen, allerdings mit eingeschränkter Bewegungsmöglichkeit. Für den 2x2 Meter Radius wurde geplant, die Stationen der Arbeitsreihenfolge nacheinander ein- und auszublenden, um ein einengendes Gefühl und eine zu nahe aneinander Reihung der Stationen zu verhindern. Die Durchführung des 2x2 Meter Radius wurde in einem Pausenraum mit der Größe eines Klassenzimmers geplant. Für den 4x4 und den 6x6 Meter Radius wurde die Sporthalle der Schule ausgewählt.

Aus den Kriterien und der dazugehörigen Theorie wird abgeleitet, dass durch einen größeren Bewegungsradius die Selbstlokation und die Aufmerksamkeit auf die Umgebung verbessert wird (siehe Kapitel 2.1). Damit steigt die eigene Auseinandersetzung ihr und beeinflusst so durch das kognitive Involvement den Hypothesentest positiv. Dies wiederum wirkt sich positiv auf das räumliche Präsenzerleben aus.

Die mögliche Anordnung der drei Lernstationen in den unterschiedlichen Bewegungsradien wurde im Vorfeld bereits geprüft. In Abbildung 8 ist die mögliche Anordnung der Stationen für 6x6 Meter optimiert. Zu sehen sind die Radien 2x2 Meter in blau, 4x4 Meter in rot und 6x6 Meter in grün. Es wird deutlich, dass Station drei in dieser Anordnung nur im 6x6 und Station zwei nur im 4x4 Meter Radius erreichbar wäre.



Abbildung 8: Konzeptionelle Darstellung der Bewegungsradien in der VR-Lernumgebung mit den Lernstationen aus der Vogelperspektive. 2x2 Meter Radius in blau, 4x4 in rot und 6x6 in grün. Hinweis: Die Grasdichte auf den Screenshots nimmt mit zunehmender Distanz ab, da die Screenshots im Editormodus aufgenommen wurden. Dies ist eine Einstellung, um Rechenleistung während der Bearbeitung der Fläche zu sparen.

### Mikrozyklus 3: Umgebungsgeräusche

Folgendes Kriterium wurde in diesem Zyklus beachtet:

- Auditive Reize sollten durch Soundscapes integriert werden und können das individuelle Erleben der Landschaft beeinflussen (Edler et al., 2019).

In Mikrozyklus drei wurden realistische Umgebungsgeräusche hinzugefügt und evaluiert. Vogelgezwitscher, leichtes Windrauschen und Blätterrauschen in den Bäumen sowie Wasserplätschern im Fluss wurden eingeblendet. Die Geräusche wurden als Raumklang programmiert, der die Wahrnehmung anpasst, wenn sich von der Klangquelle entfernt oder der Kopf gedreht wird. Wenn zum Beispiel der Kopf nach links gedreht wird, während sich die Klangquelle vor den Teilnehmenden befindet, wird der Klang für das rechte Ohr lauter und für das linke leiser. Wenn sich von der Soundquelle wegbewegt wird, wird der Klang Schritt für Schritt leiser. Realistische Audio-Sounds (Soundscapes) sollen dazu beitragen, dass die VR-Umgebung noch immersiver wird und die Teilnehmenden auch über den auditiven Kanal anspricht und überzeugt. Das sollte durch eine erhöhte Aufmerksamkeitszuwendung aufgrund der Geräusche und eine damit verbundene Stärkung des räumlichen Situationsmodells durch Hinweisreize geschehen. Die Soundquellen wurden im Fluss und über dem Startpunkt platziert.

### Mikrozyklus 4-6:

Folgende Kriterien wurden bei der Konzeption der einzelnen Lernstationen beachtet:

- Lernen in VR, sogenanntes Immersive Learning, wird maßgeblich von Immersion, Präsenz, Motivation sowie kognitiven und emotionalen Faktoren beeinflusst (Dengel & Mägdefrau,

2018; Makransky & Petersen, 2021). Bei der Entwicklung von Lernstationen sollte darauf geachtet werden, dass für den bereitgestellten Lernstoff die Vorteile von VR genutzt und die Teilnehmenden motiviert werden können. Die kognitiven Hürden zur Bewältigung der Lernaufgaben in VR müssen angemessen sein.

- Lernen in VR wird von Embodiment beeinflusst und es gibt noch keine Designrichtlinien dafür (Johnson-Glenberg, 2018). Wenn Verkörperung genutzt wird, sollte auf eine angemessene Umsetzung geachtet werden, um keine negativen Einflüsse auf das Präsenzerleben auszulösen.
- Erleichtern Sie die kognitive Anstrengung.
- Verwenden Sie geführte Erkundung.
- Bauen Sie Gelegenheiten zur Reflexion ein.
- Verwenden Sie die Handsteuerung für aktives, körperbasiertes Lernen.
- Lerninhalte sollen in komplexe, relevante und realitätsnahe Lernsituationen eingebettet werden.
- Lerninhalte und Hilfsmaterialien sollen situations- und bedarfsgerecht bereitgestellt werden.
- Lernmaterialien sollen vielfältig und in unterschiedlichen Darstellungsformen dargestellt werden.

Die detaillierte Konzeption der Lernstationen inklusive fachwissenschaftlicher Hintergründe und curricularer Einordnung folgt in Kapitel 3.4. In den Lernstationen wurde zum ersten Mal Gebrauch von der Verkörperung (Embodiment) gemacht. Die Teilnehmenden erhielten Roboterhandmodelle, die sie mit den Controllern steuern konnten. Durch diese Verkörperung und die damit verbundenen aktiven Handlungsmöglichkeiten der Lernstation wurde ein starker Anstieg des Präsenzerlebens angenommen. Die Lernstationen sind so konzipiert, dass die Teilnehmenden sich in der VR-Lernumgebung bewegen und mit der Umwelt interagieren müssen. Aus der Theorie wird abgeleitet, dass diese Bewegung durch den Raum als auch die Handlungen die Selbstlokation und damit auch das Präsenzerleben fördern. Es wurde untersucht, ob realitätsnahe Interaktionen während der Bearbeitung einen Einfluss auf den Realismus und das Präsenzerleben ausüben. Lernstation eins besitzt ausschließlich realitätsnahe Interaktionen, Lernstation zwei ausschließlich realitätsferne. Lernstation drei bildet eine Mischung aus realitätsnah- und fern. Durch die zu bearbeitenden Lernaufgaben wird ein hohes kognitives Involvement der Teilnehmenden angenommen, dass sich positiv auf das räumliche Präsenzerleben auswirkt. Folgende Lernstationen wurden konzipiert:

- Lernstation 1 – Messen von CO<sub>2</sub>-Ausgasungen
- Lernstation 2 – CO<sub>2</sub>-Ausgasung aus Fließgewässern
- Lernstation 3 – Wälder und Bäume als CO<sub>2</sub>-Senken

Aus technischen Gründen konnte das folgende Kriterium nicht umgesetzt werden:

- Soziale Interaktionen zur Ver- bzw. Bearbeitung der Lerninhalte, sofern technisch und finanziell möglich, sollen ermöglicht werden.

Die benötigte technische Infrastruktur als auch die Programmierfähigkeiten ließen eine Umsetzung dieses Kriteriums nicht zu.

## **Bearbeitungsablauf**

Die Bearbeitung der Mikrozyklen folgte einem standardisierten Ablauf. Die Teilnehmenden erhielten zu Beginn ein Blatt mit Arbeitsaufträgen, das sie durchlesen mussten. Die Arbeitsaufträge wurden daraufhin selbstständig durchgeführt.

Die Arbeitsaufträge für Mikrozyklus eins bis drei lauteten:

1. Fülle den Fragebogen bis zum Thema Motivation aus.
2. Ziehe die Oculus Quest Brille auf den Kopf und begib dich auf die Fläche.
3. Erkunde ein paar Minuten deine Umgebung. Nutze den gesamten Platz, der dir zur Verfügung steht. Laufe herum und sieh dir alles genau an.
4. Ziehe dann die Brille wieder ab und fülle unseren Fragebogen bis zum Ende aus.

Die Arbeitsaufträge für Mikrozyklus vier bis sechs lauteten:

1. Fülle den Fragebogen bis zum Thema Motivation aus.
2. Höre dir die kurze Einführung von Herrn Rieger an.
3. Ziehe die Oculus Quest Brille auf den Kopf und begib dich auf die Fläche.
4. Bearbeite die erste Station zum Thema „Messen“.
5. Ziehe dann die Brille wieder ab und fülle unseren Fragebogen bis zum Ende aus.

Punkt vier wurde an die Stationsnummern und Namen angepasst. Die Einführung, die gegeben wurde, war standardisiert und damit für alle Teilnehmenden gleich. Sie beinhaltete eine kurze Begrüßung sowie Einleitung, dass eine interaktive Lernstation bearbeitet wird, ebenso wie das Thema der Lernstation. In den Mikrozyklen eins bis drei verweilten die Teilnehmenden zwei Minuten in der virtuellen Realität. In den Zyklen vier bis sechs wurden die Lernstationen für eine Bearbeitungszeit von circa 10-15 Minuten pro Station konzipiert. Die zwei Minuten in Mikrozyklus eins bis drei wurden unter der Annahme gewählt, dass räumliches Präsenzerleben mit Aufziehen der Brille direkt eintreten kann. Die Prozesse werden in der Theorie so dargestellt, dass sobald die Reize wahrgenommen werden, der Hypothesentest durchgeführt wird und dies zu Präsenzerleben führen kann. Zwei Minuten werden als ein ausreichender Zeitraum angenommen, in dem es ermöglicht wird, die Umgebung zu erkunden und dadurch die subjektiven Prozesse für das Präsenzerleben zu festigen oder zu verwerfen. Der Zeitraum der Lernstationen wurde so gewählt, dass eine Durchführung aller drei Stationen in einer regulären Unterrichtsstunde von 45 Minuten leistbar ist.

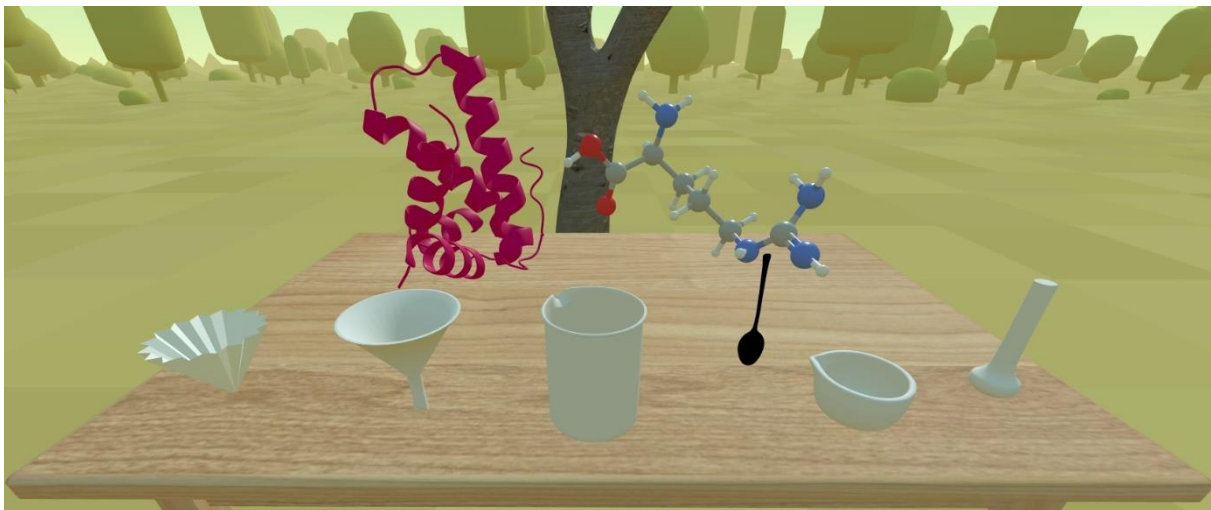
Bei der nun folgenden Konzeption der virtuellen Umgebung (Kapitel 3.3) als auch der Lernstationen (Kapitel 3.4) wird sich an den aus der Theorie extrahierten und nun in den Mikrozyklen verorteten Kriterien orientiert.

## **3.2 Auswahl der Entwicklungsumgebung**

Folgende Kriterien wurden bei der Auswahl der Entwicklungsumgebung zusätzlich beachtet:

- Motion Sickness muss vermieden werden (Chattha et al., 2020).
- Der kognitive Prozess, der räumliches Präsenzerleben ermöglicht, kann stark von Immersion und der dazugehörigen Hard- und Software beeinflusst werden (Cummings & Bailenson, 2016). State of the Art Technology sollte zur Programmierung und Durchführung genutzt werden, um die bestmöglichen immersiven Reize zu produzieren.

Die technisch erzeugte Immersion spielt eine wichtige Rolle für das räumliche Präsenzerleben, als auch für immersive Learning (Cummings & Bailenson, 2016; Dengel & Mägdefrau, 2018; Hartmann et al., 2005; Makransky & Petersen, 2021). Die Wahl der Entwicklungsumgebung ist hierbei entscheidend, da sie die Darstellung der 3-D-Modelle sowie die möglichen Interaktionen und die von der Umgebung erzeugte Reizstimulierung beeinflusst. Bei der Auswahl der Entwicklungsumgebung wurde zunächst das Open Source Framework A-Frame herangezogen. Mit A-Frame können 3-D Welten für VR als auch AR erstellt werden. Ebenso ist es möglich, 3-D Modelle zu importieren und diese darin zu manipulieren. A-Frame wurde dazu entwickelt, auf einer Webbrowseroberfläche (zum Beispiel Chrome, Edge oder Firefox) eingesetzt zu werden, um einen webbasierten, geräteübergreifenden VR- und AR-Einsatz zu ermöglichen. Da es sich zu Entwicklungsbeginn der VR-Lernumgebung noch um ein recht unausgereiftes Tool handelte, wurde mit der zu dieser Zeit aktuellen Version (0.8) gestartet. Diese Umgebung wurde gewählt, da der praktische Einsatz im Unterricht und die damit verbundene Umsetzung der Infrastruktur erleichtert werden sollte. Durch die Möglichkeit, browserbasiert zu arbeiten, ist der Einsatz von Smartphones als VR-Brillen denkbar. Dies kann für Schulen einen finanziellen Vorteil in der Beschaffung von Geräten bedeuten, da VR-fähige Smartphones günstiger sein können als VR-Brillen. Die Implementierung der 3-D Modelle und die Modellierung einer basalen Umgebung gestaltete sich zunächst unproblematisch (siehe Abbildung 9).



**Abbildung 9:** Experimentierutensilien mit Moringa-Protein (rot) und einem Molekülprototyp im ersten VR-Prototyp in A-Frame.

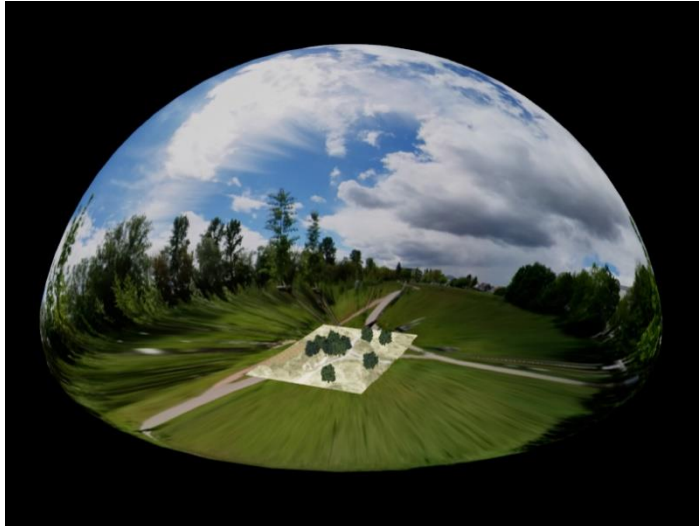
Als sich mit zunehmender Konzeption der Umgebung herauskristallisierte, dass die Umgebungsdetails aufgrund des geforderten Realismus einen sehr hohen Grad an Detailgenauigkeit erforderten, zeigten sich die Limitationen des Frameworks. Als Beispiel kann hierfür die realistische Darstellung und Animation von Gras angeführt werden. A-Frame verfügte über keine Möglichkeit, sogenanntes Instancing durchzuführen. Instancing ist ein Verfahren, in dem ein 3-D-Modell vom Computer gezeichnet (gerendert) und diese Abbildung daraufhin vervielfältigt wird, ohne die Duplikate erneut rendern zu müssen. Dies spart enorme Rechenressourcen des Prozessors (CPU) und der Grafikkarte (GPU) im Entwicklungsprozess als auch später bei der Verwendung des fertigen Produkts. Grashalme verbrauchen durch ihre große Anzahl bereits eine nicht unerhebliche Menge an Rechenleistung, wenn kein Instancing genutzt wird, obwohl sie keine komplexen Formen besitzen. 3-D-Modelle bestehen aus sogenannten Triangles (Dreiecken). Je komplexer das 3-D-Modell, desto mehr Triangles müssen genutzt werden, um die

Strukturen des Modells darstellen zu können. Da zu diesem Zeitpunkt der Entwicklung bereits geplant war, dass komplexe und animierte 3-D-Modelle wie Bäume, Blumen, Gras, ein Fluss und Lernstationen modelliert und auch durch Instancing auf der Fläche platziert werden müssen, musste auf eine andere Entwicklungsumgebung ausgewichen werden, die den technischen Anforderungen besser entsprach. Gewählt wurde hierfür die Unreal Engine 4 (Version 4.26), welche vom Entwicklungsstudio Epic Games seit 2015 der Öffentlichkeit (unter anderem zu Forschungszwecken) kostenlos zur Verfügung gestellt wird. Als stärkste Spiel-Engine die auf dem Markt erhältlich ist, bietet sie alle Möglichkeiten, die für die Entwicklung einer VR-Lernumgebung gebraucht werden. Aufgrund der nicht-technischen Ausrichtung dieser Arbeit wird darauf verzichtet, auf technische Details vertieft einzugehen, die erforderlich sind, um die VR-Lernumgebung zu programmieren. Technische Notwendigkeiten und generalisierte Prozesse sowie Merkmale, die den Designprozess der Mikrozyklen beeinflussen, werden jedoch näher erläutert und ausgeführt. Zur Durchführung der Erhebung wurde die erste Version der Oculus Quest VR-Brille ausgewählt und für eine qualitativ hochwertige Darstellung der in der Unreal Engine gestalteten Umgebung vom Smartphone-Einsatz abgesehen.

### **3.3 Aufbau der realitätsnahen VR-Umgebung**

Bei der Nachbildung eines Ausschnitts eines außerschulischen Lernorts und damit einem realen Ort ist ein realitätsnahes Design wichtig. Die Grundfläche besteht aus einer quadratischen Fläche, die auf die Höhenverhältnisse des originalen Standorts angepasst wurde. Die Vertiefung des Flusses wurde mit einem 3-D-Modell, welches Wasser imitiert, gefüllt und mit einer Animation versehen, die das Wasser natürlich fließend erscheinen lässt. Die Vegetation als auch die Infrastruktur wurde weitestgehend der Realität nachempfunden. Es wurden die vor Ort befindlichen Schilder, Bänke und Wege 3-D-modelliert und eingefügt. Die Positionen der Vegetation wurden auch den realweltlichen nachempfunden, sodass Bäume und Pflanzen möglichst genau an derselben Position verankert wurden. Das Gras wurde mit einer Animation versehen, die das natürliche Wogen der Grashalme im Wind simulierte. Um eine realistische Umgebung in der Ferne darzustellen, wurde ein 360°-Bild des Ortes aufgenommen und als Kuppel um die Fläche gespannt, sodass ein fließender Übergang von der 3-D-Oberfläche zum Bild entstand. Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, werden circa 50 Prozent des Bildes als Grundfläche des Domes verzerrt und unterhalb der VR-Fläche angezeigt, um darüber die Kuppel zu erzeugen.





**Abbildung 10:** Darstellung der 360° Kuppel um die Grundfläche der VR-Lernumgebung (Mitte) aus der Unreal Engine.

Aufgrund der hohen Hardware-Anforderungen realistischer Assets und ihrer Animation kam der Ausbau und das damit verbundene Rendering der entfernten Umgebung in vollem Umfang nicht in Frage. Ebenso wurde darauf geachtet, dass das Licht möglichst realistisch ausgestaltet wurde. Es wurden zielgerichtete Lichtquellen eingebaut, die den Stand der Sonne der 360° Kuppel imitierten. Bei ersten Betrachtungen stellte sich heraus, dass das 360° Bild der originalen Umgebung aus VR-Perspektive eine zu niedrige Auflösung hatte und durch die Ausdehnung als Kuppel sichtbar verpixelt wurde. Dies steht in klarem Kontrast zur realistischen Darstellung der 3-D Modelle und kann das räumliche Präsenzerleben negativ beeinflussen. Da die Erstellung von hochauflösenden 360° Bildern für solche Zwecke Expertise und Equipment voraussetzt, das nicht vorhanden war, wurde sich dazu entschieden auf ein frei verfügbares Bild, das von Flora, Fauna und allgemeiner Umgebung dem originalen Standort ähnelt, auszuweichen (siehe Abbildung 11).



**Abbildung 11:** Hochauflösendes HDRI Bild welches in der Evaluation des Mikrozyklus 1 verwendet wurde. Die große Grundfläche in den unteren 50% des Bildes wurde als flacher Boden gespannt, während die oberen 50% des Bildes zu einer Kuppel geformt wurden, um die Form aus Abbildung 13 anzunehmen. Das Bild ist kostenlos verfügbar unter: [https://polyhaven.com/a/approaching\\_storm](https://polyhaven.com/a/approaching_storm).

Eine technische Hürde bildete die Darstellung der üppigen Fülle der Flora. Durch die vielen komplexen Pflanzenmodelle wird eine große Rechenleistung von CPU und GPU vorausgesetzt. Bei einer PC-Version der Umgebung, also einer Version, die von einem PC betrieben und normal auf einem Desktop-Monitor angezeigt wird, ist das Rendering einer pflanzenreichen Welt mit vielen Animationen machbar. Für VR wird eine besondere Art der Darstellung genutzt, die wesentlich mehr Rechenleistung benötigt. Das zu sehende Bild wird gleichzeitig für beide Augen einzeln generiert und erfordert dadurch eine erhöhte Rechenleistung im Gegensatz zu herkömmlichen Desktopvarianten. Geplant war die üppige Sommerlandschaft der realen Fläche in VR abzubilden (siehe Abbildung 12).



**Abbildung 12: Ursprünglich geplante Vegetation am Flussufer, welche aufgrund von Hardwarelimitationen in der VR-Version nicht möglich war.**

Durch die geforderte Rechenleistung konnte dies aber nicht ruckelfrei und mit ausreichender FPS-Zahl im Endprodukt erzeugt werden, ohne Motion Sickness zu verursachen (siehe Kapitel 2.2). Deshalb wurde eine Verringerung der Pflanzenzahl und Animationen durchgeführt. Die finalisierte Umgebung hatte nur noch eine geringe Anzahl an Uferpflanzen, lief aber dafür ruckelfrei und mit einem schärferen 360° Dome (siehe Abbildung 13).





**Abbildung 13: In MZ eins evaluierter Prototyp ohne die geplante Vegetation.**

Es wurden Soundscapes von Bachgeplätscher, raschelnden Blättern im Wind sowie Vogelgezwitscher platziert. Die Unreal Engine stellt eine Funktion zur Verfügung, um Sounds als Raumklang erlebbar zu machen. Die Sounds wurden so angepasst, dass sie einem realitätsnahen Umfeld entsprechen. Sie wurden bis zur Durchführung von Mikrozyklus drei deaktiviert.

Um die unterschiedlichen Körpergrößen der Teilnehmenden zu berücksichtigen, wurde auf die automatische Augenhöhenerkennung der Unreal Engine zurückgegriffen. Als Grundeinstellung wird das Element, das für die Blickhöhe verantwortlich ist am Boden der VR-Lernumgebung platziert. Die Unreal Engine interagiert mit der VR-Brille und liest aus auf welcher Höhe sie sich im Verhältnis zum realen Boden befindet, wenn sie von Nutzenden aufgezo-gen wird und addiert diese Höhe zur Grundposition des Elements. So wird die nahezu exakte Position der Augenhöhe ermittelt und in VR umgesetzt.

Auf Basis der Ergebnisse aus Mikrozyklus eins wurden diverse Überarbeitungen der Grundfläche vorgenommen. Aus strukturellen Gründen dieser Arbeit muss die neue Konzeption bereits hier thematisiert werden. Die vertiefende Ergebnisanalyse hierzu kann Kapitel 5 entnommen werden. Es wurden beispielsweise die Qualität mancher 3-D-Modelle, die Lichtreflexion und die Wasseranimation kritisiert. Die realistische Animation von Wasser in 3-D-Umgebungen ist sehr rechenintensiv und komplex zu umzusetzen. Es wurde ein Asset erstellt, das mehr Transparenz als auch eine realistischere Wasserbewegung besitzt. Zusätzlich wurde die 360°-Kuppel mit einer Auflösung von 4 K ausgetauscht und mit einem 16 K Waldrandpanorama ersetzt (siehe Abbildung 14). Die mangelhaften 3-D-Modelle der Bäume wurden entfernt und neue, hochauflösende Modelle eingefügt. Die Lichtreflexion der Blätter wurde überarbeitet. Windbewegungen der Bäume und Äste wurden hinzugefügt, um der Umgebung mehr Leben einzuhauchen. Zusätzlich wurden mehr einheimische Pflanzenarten auf der Fläche und am Flussufer verteilt. Auch der Code der automatischen Augenhöhen-Erkennung wurde überarbeitet, um mögliche Fehlfunktionen auszuschließen.



**Abbildung 14:** Die aktualisierten Baum-Modelle im Vordergrund mit dem neuen, hochauflösenden 16 K HDRI-Bild, um die Kohärenz der Umgebung zu gewährleisten.

### **3.4 Aufbau der Lernstationen**

Für die Lerninhalte werden drei Lernstationen konzipiert, die thematisch zusammenhängen. Die technisch ausgerichteten Kriterien wurden für die realitätsnahe Umgebung bereits berücksichtigt und übertragen sich damit automatisch auf die Lernstationen, die in dieser Umgebung verankert werden. Die den Mikrozyklen vier bis sechs zugeordneten Kriterien kommen hier zur Anwendung.

Die Forderung nach lebensnahen Inhalten wird durch die thematische Wahl des Lerninhalts erfüllt. Es wird hierfür der Kohlenstoffkreislauf mit seinen Komponenten der CO<sub>2</sub>-Ausgasung, Messung und Speicherung gewählt. Es stellt einen alltagsnahen Lerninhalt dar, der in vielfältiger Weise im Unterricht thematisiert werden kann, wie beispielsweise beim fächerübergreifenden Thema Klimawandel. Die Lernstationen werden in den realitätsnahen Nachbau des außerschulischen Lernorts eingebettet, der ein für den Inhalt relevantes Setting darstellt und verstärken somit die Realitätsnähe (Risch et al., 2019). Die nur in VR mögliche Manipulation der Umgebung sowie die direkte Verknüpfung von Umgebung und Lernstoff ermöglichen, das Maß an potenzieller Komplexität des Lerninhalts detaillierter umzusetzen. Durch realitätsnahe sowie realitätsferne Interaktionen werden den Teilnehmenden Möglichkeiten geboten, die ein breites Spektrum der für Präsenzerleben relevanten Variablen ansprechen sollen. Diese Interaktionen werden nachfolgend in den einzelnen Stationen vorgestellt. Innerhalb dieser komplexen Lernstationen kann das vom Konstruktivismus geforderte Scaffolding realisiert werden, indem sowohl auditive als auch visuelle Arbeitsanweisungen eingeblendet werden. Es werden ebenfalls durch einen sequenziellen Aufbau der Lernstationen und den Einsatz von programmierten Fortschrittsmarkern automatisch Hilfestellungen eingeblendet, die bei der Bearbeitung der Aufgabe verwendet werden können. Sobald bestimmte Aufgaben der Lernstation oder Orte innerhalb der VR erreicht werden, werden fortführende und/oder unterstützende Materialien eingeblendet. Die Lernmaterialien der Lernstationen folgen der konstruktivistischen Forderung, dass vielfältige Sichtweisen und Repräsentationsformen genutzt werden sollen, um die Inhalte

vielfach darzustellen. Diese werden über alle Stationen hinweg als Bilder, Videos, 3-D-Animationen sowie Text und Audio verfüg- und erlebbar gemacht. Die Lernstationen können im praktischen Schulunterricht im Format Entdeckendes Lernen eingesetzt werden. Es ist denkbar, alle Stationen gleichzeitig zur selbstständigen Bearbeitung verfügbar zu machen oder sie einzeln in bestimmten Unterrichtsphasen einzusetzen.

Die Lernstationen wurden technisch so konzipiert, dass sie unabhängig von der virtuellen Umgebung funktionieren und deshalb nach Bedarf zu ausgewählten Zeitpunkten des Forschungsdesigns implementiert werden konnten. Es wird nun auf alle drei Lernstationen in der Reihenfolge der Bearbeitung durch die Teilnehmenden (Mikrozyklus vier, fünf und sechs) eingegangen. Vor der Erläuterung der Umsetzung der Stationen in VR erfolgt eine Einführung in die Grundlagen des Kohlenstoffkreislaufs als Basiswissen. Danach wird auf jede Lernstation einzeln eingegangen. Jede Lernstationserklärung beinhaltet zusätzlich eine Ausführung der vertiefenden fachwissenschaftlichen Fundamente der Stationsinhalte. Dies dient dazu, die Konzeption der jeweiligen Lernstation besser nachzuvollziehen.

### Kohlenstoffkreislauf und die Rolle des CO<sub>2</sub>

Auf der Erde gibt es verschiedene Kohlenstoffreservoirs: die Atmosphäre, das Land, aquatische Bereiche (vorwiegend die Meere), Gesteine und Sedimente sowie Biomasse (Reineke & Schlömann, 2020). Mögliche Vorkommen sind beispielsweise organische Kohlenstoffe, Carbonate, in Wasser gelöstes CO<sub>2</sub> und Kohlenstoffreserven in Formen von Kohle und Naturgas (ebd.).

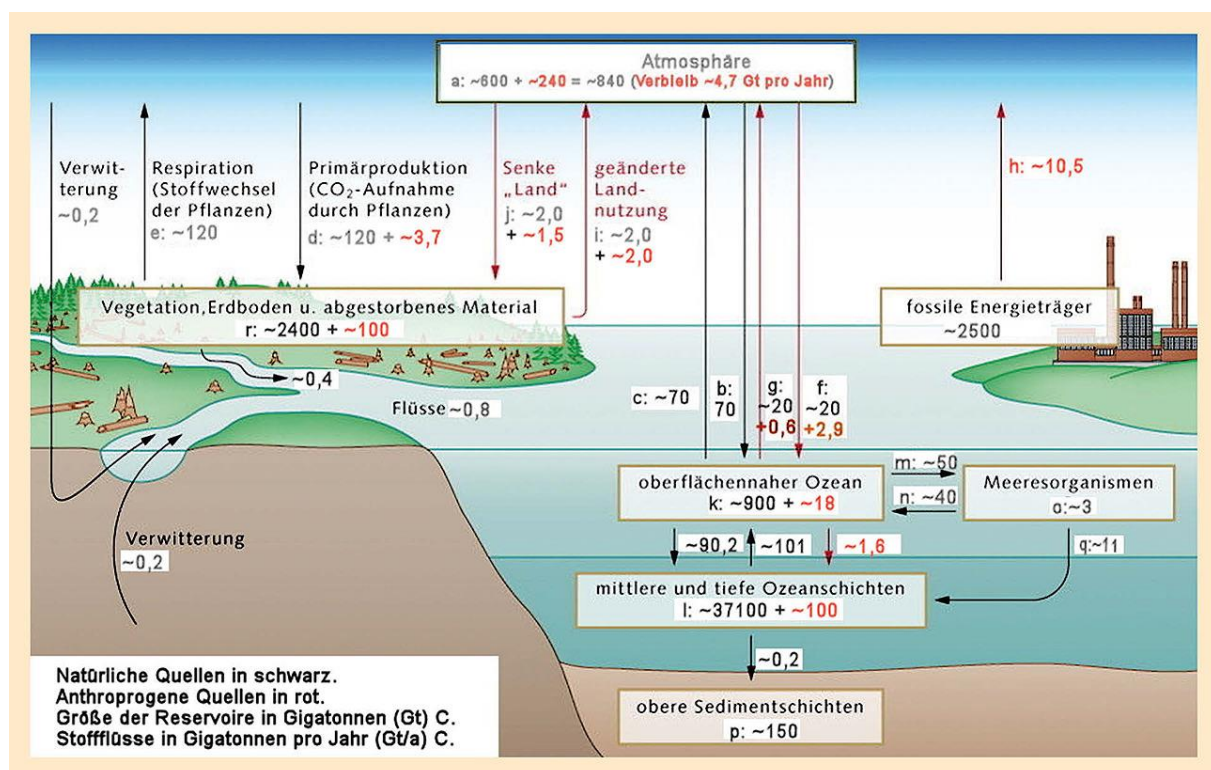


Abbildung 15: Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs (Wöhrle, 2021).

In Abbildung 15 ist der globale Kohlenstoffkreislauf mit eingetragenen Mengenangaben an Kohlenstoff in Giga-Tonnen dargestellt (Wöhrle, 2021). Erkennbar ist, wie durch abgestorbenes Material, Erdboden und Vegetation sowie Verwitterung Kohlenstoff in Gewässer



eingetragen wird. Dort findet ein Austausch aus Aufnahme und Abgabe mit der Atmosphäre statt. Durch Respiration, geänderte Landnutzung und die Nutzung fossiler Energieträger gelangt ebenfalls Kohlenstoff in die Atmosphäre. Pflanzen hingegen nehmen in ihrer Primärproduktion CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre wieder auf. Die Gesamtmenge an Kohlenstoff in den verschiedenen Sphären der Erde beträgt rund 75 Millionen Gigatonnen, die durch kurzweilige oder langfristige chemische Umwandlungen/Transporte zirkulieren (ebd.). Dieser Prozess besteht aus verschiedenen Facetten, wie etwa Umwandlung von Kohlenstoff durch Pflanzen, Menschen, Tiere und Mikroorganismen. Dies umfasst zum Beispiel die Photosynthese, die Atmung und das Absterben von Organismen und die Verbrennung von fossilen Brennstoffen (ebd.). Bei dieser Zirkulation spielt besonders das CO<sub>2</sub> eine tragende Rolle, da es den natürlichen Treibhauseffekt beeinflusst (ebd.). Es wird dementsprechend auch als indirektes Klimagas bezeichnet, da es die Chemie der Troposphäre maßgeblich mitgestaltet (Reineke & Schlömann, 2020). Flohn (1981) beschreibt, dass das durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehende CO<sub>2</sub> für eine einschneidende Änderung des globalen Klimasystems mit verantwortlich ist. Dies wurde bis heute von Forschenden in zahlreichen Studien nachgewiesen (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina, 2021). Trotz wachsendem Bewusstsein darüber nahmen die CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 2000-2014 um 2,6 % pro Jahr zu, was etwa zwischen 30-35,5 Gigatonnen entspricht (Mac Dowell et al., 2017). Die globale CO<sub>2</sub> Emission stieg weiterhin an und erreichte 2022 einen Höchstwert von circa 36,6 Giga-Tonnen (Friedlingstein et al., 2022). In den konzipierten Lernstationen wird die Messung von CO<sub>2</sub>, das Ausgasen von CO<sub>2</sub> aus Fließgewässern und die Speicherung von CO<sub>2</sub> durch Bäume thematisiert und vertieft.

### **Lernstation 1 – Messen von CO<sub>2</sub>**

In Lernstation eins wird ein realistisches Lernsetting genutzt, in dem es inhaltlich um die Messung der CO<sub>2</sub>-Ausgasung aus Fließgewässern geht. Die Station erfordert eine Bewegung durch den virtuellen Raum und soll den gegebenen Bewegungsradius voll ausnutzen. Diese Nutzung des Raums und die Bewegung hindurch verspricht einen positiven Einfluss auf das räumliche Präsenzerleben (siehe Kapitel 2.1). Die Interaktionen sind ebenfalls realitätsnah konzipiert, sodass es eine weitgehende Spiegelung der Realität darstellt.

Die Messmethodik von CO<sub>2</sub> ist je nach Ausgasungsquelle oder Messort unterschiedlich. Es gibt beispielsweise Methoden, die die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen messen, während diese aktiv verändert wird (Li et al., 2020). In der Atmosphäre können Messungen mit Flugzeugen oder Ballons durchgeführt werden, an denen Messapparate befestigt sind (Nakazawa et al., 1995) und indem gesammelte Proben aus unterschiedlichen Lokalisationen und Stoffen analysiert werden. Für die Messung von ausgasendem CO<sub>2</sub> aus Böden gibt es unterschiedliche Kammertechniken, die eingesetzt werden können: eine geschlossene statische, eine geschlossene dynamische und eine dynamische Kammer (Pumpanen et al., 2004). Ein standardisierter Einsatz dieser Techniken am Boden hat sich unter anderem wegen mangelnder Kalibrierung noch nicht durchgesetzt (ebd.). Bei der Messung der Ausgasung von CO<sub>2</sub> aus Fließgewässern ist wie bei der Messung aus Böden eine standardisierte Messung noch nicht vorhanden und es steht in der aktuellen Forschung zur Diskussion, ob schwimmende oder verankerte Kammern die valideren Messungsergebnisse in bewegtem Wasser liefern (Rawitch et al., 2021). Lorke et al. (2015) haben in einer Studie nachgewiesen, dass im Wasser fest verankerte Kammern die Messung von Treibhausgasen wie CO<sub>2</sub> nicht akkurat wiedergeben. Im Vergleich sind sogenannte

Driftkammern (Flow-Chamber) eine zuverlässigere Lösung mit valideren Ergebnissen, auch wenn Verzerrungen in der räumlichen Bewegung über das Wasser möglich sind (ebd.). In ihrer Studie wurde unter anderem  $\text{CO}_2$ , die Temperatur als auch die oberflächennahe Strömungsgeschwindigkeit gemessen. Die Temperatur als auch die oberflächennahe Strömungsgeschwindigkeit, die mit Turbulenzen des Wassers zusammenhängen kann, können die Ausgasung begünstigen (Ulseth et al., 2019). Die Sensoren befanden sich unter der dafür genutzten Driftkammer, die auf der Wasseroberfläche entweder unabhängig geschwommen ist oder mithilfe eines Bootes gezogen wurde. Eine solche Driftkammer (englisch: Floating-Chamber) wurde realitätsnah für den Einsatz in VR nachgebaut (siehe Abbildung 16).



**Abbildung 16: Realer Nachbau einer Floating-Chamber (oben). 3-D-Modell in der VR-Lernumgebung (unten). Eingebaute Sensoren unterhalb der Driftkammer (rechts oben und unten).**

Um Lernstation eins zu starten, wird eine kleine runde Projektor-Einheit auf einem hellblau leuchtenden Hologramm platziert das sich auf dem bereitgestellten Stationstisch befindet (siehe Abbildung 17). Dies sorgt dafür, dass alle Teilnehmenden die Station selbst starten können, wenn sie bereit sind. Die Arbeitsaufträge erhielten sie als eingesprochene Audiosequenzen, die durch den Fortschritt während der Station getriggert wurden. Die Arbeitsaufträge wurden ebenfalls schriftlich in der Lernumgebung eingeblendet und wechselten je nach Fortschritt automatisch.



**Abbildung 17:** Die Projektor-Einheit (schwarz) musste zum Starten der Station in das blaue Hologramm auf dem Stationstisch gesetzt werden.

Zuerst bekamen die Teilnehmenden ein kurzes Lehrvideo zu sehen, in denen ihnen das zur Bearbeitung der Station notwendige Equipment sowie ein paar kurze Fakten zur CO<sub>2</sub>-Messung vorgestellt wurden. Dies sind die 3-D-Modelle der Floating-Chamber, des Temperatur- und CO<sub>2</sub>-Sensors sowie der Schutzhülle, in der sich die Floating-Chamber befindet. Die 3-D-Modelle erschienen, nachdem das Video beendet war, automatisch vor ihnen zur möglichen Benutzung auf dem Tisch. Daraufhin erhielten sie den Arbeitsauftrag die Floating-Chamber zusammenzubauen (siehe Abbildung 18).



**Abbildung 18:** Zusammenbau der Floating-Chamber (links) mit Sensoren und einem Deckel.

Nach dem Zusammenbau wurden die Teilnehmenden aufgefordert, die Floating-Chamber sowie ein ebenfalls automatisch erschienenes Tablet zu nehmen und zum Fluss zu gehen. Dort



musste die Messkammer auf die Wasseroberfläche gelegt werden, was die Messung startete. An den jeweiligen Positionen wurden die Arbeitsaufträge zusätzlich schriftlich eingeblendet (siehe Abbildung 19).



**Abbildung 19:** Darstellung des Wegs vom Stationstisch zum Fluss, um die Messung zu starten. Im virtuellen Raum sind die Arbeitsschritte eingeblendet, die als Stimme hörbar waren.

Mit dem Starten der Messung wurde das Tablet aktiviert. Es zeigte die Oberfläche einer Messsoftware während einer realen Messung als Videoclip. So wurde die Messung realitätsnah simuliert (siehe Abbildung 20).



**Abbildung 20:** Ablesen der Messwerte auf dem Tablet, während die Floating Chamber auf dem Fluss liegt.

Nach der Messung wurde zum Startpunkt zurückgekehrt, wo eine abschließende Sequenz eingeleitet wurde. Damit wurde die Station beendet und die CO<sub>2</sub>-Lupe, das Werkzeug der Station zwei, eingeführt. Die CO<sub>2</sub>-Lupe ist das 3-D-Modell einer realweltlichen Lupe, die so

programmiert wurde, dass sie es in VR ermöglicht, die CO<sub>2</sub> Ausgasung auf Teilchenebene zu beobachten. Technisch funktioniert sie vereinfacht erklärt, so, dass sie versteckte und für das Auge unsichtbare Animationen innerhalb der VR in einem quaderförmigen Bereich hinter dem Lupenglas einblendet und sichtbar macht, wenn sie vor das Gesicht gehalten wird.

Verkörperung (Embodiment) wurde in dieser Station zum ersten Mal eingesetzt. Die Teilnehmenden erhielten Roboterhandmodelle, die sie mit den Controllern steuern konnten. Die Programmierung von realitätsnahen Avataren, die den Erwartungen der individuellen Teilnehmenden gerecht werden können, überstieg die Machbarkeit innerhalb des Projekts. Deshalb wurden nur die Hände und ihre Interaktionen visualisiert. Durch diese Verkörperung und die damit verbundenen aktiven Handlungsmöglichkeiten während der Lernstation wird ein Anstieg des Präsenzerlebens angenommen (Johnson-Glenberg, 2019). Aus der Theorie wird abgeleitet, dass diese Bewegung durch den Raum die Selbstlokation und damit auch das Präsenzerleben fördert (Hartmann et al., 2015). Es wird außerdem angenommen, dass die realistisch designten 3-D Modelle sowie die realitätsnahen Interaktionen keinen negativen Einfluss auf den wahrgenommenen Realismus der Umgebung und damit auf das räumliche Präsenzerleben haben (Gilbert, 2016). Durch die Lernaufgaben wird ein hohes kognitives Involvement erwartet, dass sich positiv auf das räumliche Präsenzerleben auswirkt (Hofer, 2016; Wirth, 2012).

## **Lernstation 2 - CO<sub>2</sub>-Ausgasung aus Fließgewässern**

In Lernstation zwei werden realitätsferne Manipulationsmöglichkeiten der VR-Umwelt genutzt, um inhaltlich die Faktoren der CO<sub>2</sub>-Ausgasung zu thematisieren. Das Setting erfordert nur geringe Bewegung durch den virtuellen Raum. Es steht konträr zu Lernstation eins und dient dazu, die Vorteile von VR (wie etwa die Manipulation der Umgebung und dem Sichtbarmachen von in der Realität Unsichtbarem) zu evaluieren. Es soll geprüft werden, ob realitätsferne Aufgaben und Möglichkeiten einen Einfluss auf das räumliche Präsenzerleben haben. Zentral im Mittelpunkt steht die CO<sub>2</sub>-Ausgasung aus dem angrenzenden Fluss.

Der aquatische Stoffwechsel eines Flusses ist einerseits auf den Sauerstoff aus der Atmosphäre angewiesen, andererseits stellt er auch eine direkte Quelle klimarelevanter Gase (wie zum Beispiel CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) dar (Ulseth et al., 2019). Flüsse transportieren Kohlenstoff in die Ozeane und bilden damit einen wichtigen Teil des Kohlenstoffkreislaufs (Regnier et al., 2013). Der Ausstoß der Gase wird benötigt, um die biogeochemischen Flüsse der aquatischen Ökosysteme zu kalkulieren, was unter anderem mit der Gasübertragungsgeschwindigkeit an der Luft-Wasser-Grenze und der Differenz der Gaskonzentration beider Seiten berechnet wird (Ulseth et al., 2019). Der Kohlenstoff in Flüssen liegt als gelöster anorganischer Kohlenstoff, gelöster organischer Kohlenstoff, partikelförmiger organischer Kohlenstoff und partikelförmiger anorganischer Kohlenstoff vor, wobei der gelöste anorganische Kohlenstoff als größter und relevantester Teil mit ca. 45 % angesehen wird (Meybeck, 1987). Gelöster anorganischer Kohlenstoff ist die Summe von Kohlensäure (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), was die Summe von wässrigem und hydratisiertem CO<sub>2</sub> darstellt, sowie Bicarbonat (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) und Carbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) (Liu & Han, 2021). Wenn die Konzentrationen der klimarelevanten Gase wie CO<sub>2</sub> im Gewässer übersättigt sind, kann es zur Ausgasung kommen (Qu et al., 2017). Einer der wichtigsten Faktoren, damit es zum Gasaustausch in Bächen und Flüssen kommen kann, sind Turbulenzen, die durch die Wasserströmung und die Beschaffenheit des Flussbetts entstehen (Raymond et al., 2012). In Seen und Meeren hingegen werden windbedingte Turbulenzen benötigt (Wanninkhof et al., 2009). Bei Seen und



Meeren sind außerdem chemische Faktoren wie die Änderung des pH-Werts (Liss, 1973) und biologische Faktoren wie Mikroorganismen relevant (Pereira et al., 2018). Die relativen Konzentrationen des CO<sub>2</sub>, Bicarbonats und Carbonats in Fließgewässern werden maßgeblich von pH-Wert und der Temperatur gesteuert (Clark & Fritz, 1997). Die Faktoren, die den für die Ausgasung relevanten Partialdruck von CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) steuern, sind sehr komplex (Liu & Han, 2021). Relevant sind unter anderem die Generierung und Transportation von CO<sub>2</sub> in Böden, der Eintrag von verwitterten Materialien, die biologischen Prozesse sowie die Atmung und Photosynthese innerhalb des Flusses (Abril et al., 2005; Pu et al., 2017; Telmer & Veizer, 1999; Yao et al., 2007). Die globale Menge der ausgestoßenen klimarelevanten Gase aus Fließgewässern wird nur in wenigen Studien kalkuliert, da viele Messwerte von Flüssen noch nicht vorhanden sind und es deshalb notwendig ist, mehr Daten zu generieren, um diese Schätzungen zu verbessern. (Rawitch et al., 2021). Ebenso fehlt es in der umweltwissenschaftlichen Forschung an einer ausgiebigen Testung der Flow-Chambers in verschiedenen Gewässertypen wie seichtem, turbulentem und fließendem Wasser (Cole et al., 2010; Lorke et al., 2015; Rawitch et al., 2021). Aufbauend zur ersten Lernstation werden in dieser die CO<sub>2</sub>-Ausgasung und die damit verbundenen Faktoren thematisiert. Die am Ende von Station zwei eingeführte „chemische Lupe“ steht hierbei im Mittelpunkt. Mit ihr wird es ermöglicht, das ausgasende CO<sub>2</sub> beim Hindurchsehen sichtbar zu machen. Die versteckte Ausgasung erfolgt aus dem animierten Fluss, der direkt neben dem sogenannten „Queich-o-Tron 3000“ fließt. Diese Apparatur wurde erstellt, um mit mehreren Hebeln die Faktoren der Ausgasung zu beeinflussen und Fragestellungen anzuzeigen sowie zu beantworten. Es konnten insgesamt vier Faktoren beeinflusst werden: (1) Abgestorbenes Pflanzenmaterial konnte ein- und ausgeblendet werden, (2) die Turbulenz des Flusses konnte manipuliert werden, (3) ebenso wie die Tageszeit (Tag/Nacht) und (4) die Anzahl der im Fluss wachsenden Pflanzen. Die Teilnehmenden können dadurch mit einer Variablenkontrollstrategie den Einfluss der verschiedenen Faktoren erforschen und mit Betätigen der Hebel die Ausgasmenge des CO<sub>2</sub> und die damit verbundene versteckte Animation beeinflussen. Die Variablenkontrollstrategie gilt als domänenübergreifende Fähigkeit und beschreibt allgemein den Vorgang kausale Zusammenhänge zwischen Variablen zu prüfen (Brandenburger et al., 2022). In dieser Station sind diese Variablen die vier Faktoren (unabhängig) sowie die CO<sub>2</sub>-Ausgasung (abhängig). Die zu erfüllende Aufgabe besteht darin, die eingeblendeten und gleichzeitig vorgelesenen Fragen mithilfe der Apparatur zu beantworten. Die Antwortmöglichkeiten wurden rechts und links der Hebel eingeblendet und mussten von den Teilnehmenden mit der Hand berührt, um als Antwort ausgewählt zu werden (siehe Abbildung 21).



Abbildung 21: Sichtbar-Machen des ausgasenden CO<sub>2</sub> durch die chemische Lupe (rechts). Direkt vor dem Fluss befindet sich der „Queich-O-Tron 3000“ mit den vier Hebeln in der Mitte sowie den zwei Antwortfeldern rechts und links (links).

Alle vier Variablen wurden nacheinander vorgestellt. Jede Variable musste einzeln und mit einer dazugehörigen, an der Apparatur eingeblendeten Frage bearbeitet werden. Im Anschluss wurde die Aufgabe gestellt, alle Hebel so einzustellen, dass die CO<sub>2</sub>-Ausgasung insgesamt möglichst gering ist. Hierfür erschienen Notizen zu den bereits bearbeiteten Variablen als Hilfestellung (siehe Abbildung 22).



Abbildung 22: Eingeblendete Notizen der zweiten Lernstation als Hilfestellung.

Mit dem richtigen Einstellen der Hebel wurde die Lernaufgabe beendet. In der zweiten Lernstation werden dieselben Annahmen bezüglich Verkörperung und Involvement wie für Station eins getroffen. Bei den realitätsfernen Interaktionen wird angenommen, dass es durch die Suspension of Disbelief, also die aktive Unterdrückung von Störreizen, möglicherweise zu einem negativen Einfluss kommen kann. Durch die Sichtbarmachung der Teilchenebene kann die Authentizität der Umgebung infrage gestellt werden.

### **Lernstation 3 – Wälder und Bäume als CO<sub>2</sub>-Senken**

In Lernstation drei werden realitätsferne als auch realitätsnahe Interaktionsmöglichkeiten genutzt, um eine hybride Form der Lernstationen eins und zwei zu bilden. Inhaltlich geht es um Wälder und Bäume, die als CO<sub>2</sub>-Senken fungieren können.

Bäume spielen für den globalen Kohlenstoffkreislauf eine wichtige Rolle und beeinflussen den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre maßgeblich (Anderson-Teixeira et al., 2021). Wälder sind für bis zu 70 % der terrestrischen Kohlenstofffixierung verantwortlich und werden deshalb als globalrelevante CO<sub>2</sub>-Senke angesehen (Gunderson & Wullschleger, 1994). In einer Studie, die die globalen Trends von CO<sub>2</sub>-Quellen und Senken untersucht, wurde herausgefunden, dass dieser senkende Effekt durch die steigende CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre zwischen 1990 bis 2009 zunahm (Sitch et al., 2015). Es wird aber auch betont, dass die Modelle, die zur Berechnung eingesetzt wurden, noch nicht umfassend genug sind und zum Beispiel die Landnutzung oder den gekoppelten Kohlenstoff-Stickstoffkreislauf nicht berücksichtigen (ebd.). Zusätzlich beinhalten die globalen CO<sub>2</sub>-Rechnungssysteme keine ausreichenden Informationen darüber, wie der Kohlenstoffkreislauf zwischen verschiedenen Waldtypen unterschiedlichen Alters variiert (Anderson-Teixeira et al., 2021). Eine Möglichkeit herauszufinden, in welcher Wechselwirkung Bäume mit dem atmosphärischen CO<sub>2</sub> stehen und wie das Baumwachstum und die Waldproduktivität beeinflusst, besteht darin die Baumringe zu untersuchen (Anderson-Teixeira et al., 2022). Um genaue Vorhersagen treffen zu können, muss von einzelnen Bäumen aus den Waldbeständen die Wachstumsrate auf der Datenbasis von biotischen und abiotischen Faktoren gemessen und modelliert werden (ebd.). Stephenson et al. (2014) zeigten, dass die Kohlenstoffakkumulation mit der Baumgröße ansteigt. Das bedeutet, dass je größer und älter ein Baum ist, desto mehr Kohlenstoff wird von ihm aufgenommen und in Masse umgewandelt (ebd.). Als Beispiel: Bäume mit einem Stammdurchmesser von 100 cm gewinnen pro Jahr zwischen 10 und 200 kg an Trockenmasse hinzu (durchschnittlich 103 kg). Ein Baum derselben Art, aber mit einem nur halb so großen Durchmesser (50cm) entwickelt nur ein Drittel dieser Masse. Umgerechnet entspricht der Zugewinn an Trockenmasse eines Baumes mit 100 cm Stammdurchmesser pro Jahr derselben Masse wie ein im selben Jahr neu gepflanzter und gewachsener Baum von 10-20 cm Durchmesser (ebd.). In der Forschung ist strittig, ob eine nachhaltige Bewirtschaftung von Wäldern besser für die weltweit gesteckten Klimaziele geeignet ist als eine Nicht-Bewirtschaftung (Luyssaert et al., 2018; Schulze et al., 2022). Bewirtschaftung von Wäldern erfolgt als Pflege von ausgewählten Zukunftsbäumen sowie Ernte und Nutzung von ausgewachsenen Bäumen um eine natürliche Verjüngung zu ermöglichen (Schulze et al., 2022). Diese Pflege erfolgt immer nur in einem bestimmten Bereich des jeweiligen Waldes mit einem Abstand von circa fünf Jahren (Schall & Ammer, 2013).



Die dritte Station besteht aus zwei Hauptkomponenten: einer Apparatur mit der ein Baumhologramm auf Knopfdruck verjüngt oder altern gelassen werden kann sowie eine Pinnwand mit Pins zum Anstecken. Neben den Knöpfen werden Informationen zum Baum eingeblendet: das Baumalter und die Masse. Die Aufgabe besteht darin, das Hologramm so einzustellen, dass die Masse zu den Jahren 0, 60, 120, 180, 240 sowie 300 ersichtlich wurde (siehe Abbildung 23).



Abbildung 23: Die Apparatur, um die Bäume altern zu lassen oder zu verjüngen. Mit den Pfeil-Knöpfen wurde das Alter manipuliert und gleichzeitig das 3-D-Modell des Baums verändert.

Diese Masse wird daraufhin auf der Pinnwand mit den Pins eingetragen (siehe Abbildung 24). Sobald alle Pins richtig angebracht sind, wird die Wachstumskurve des Baumes sichtbar.

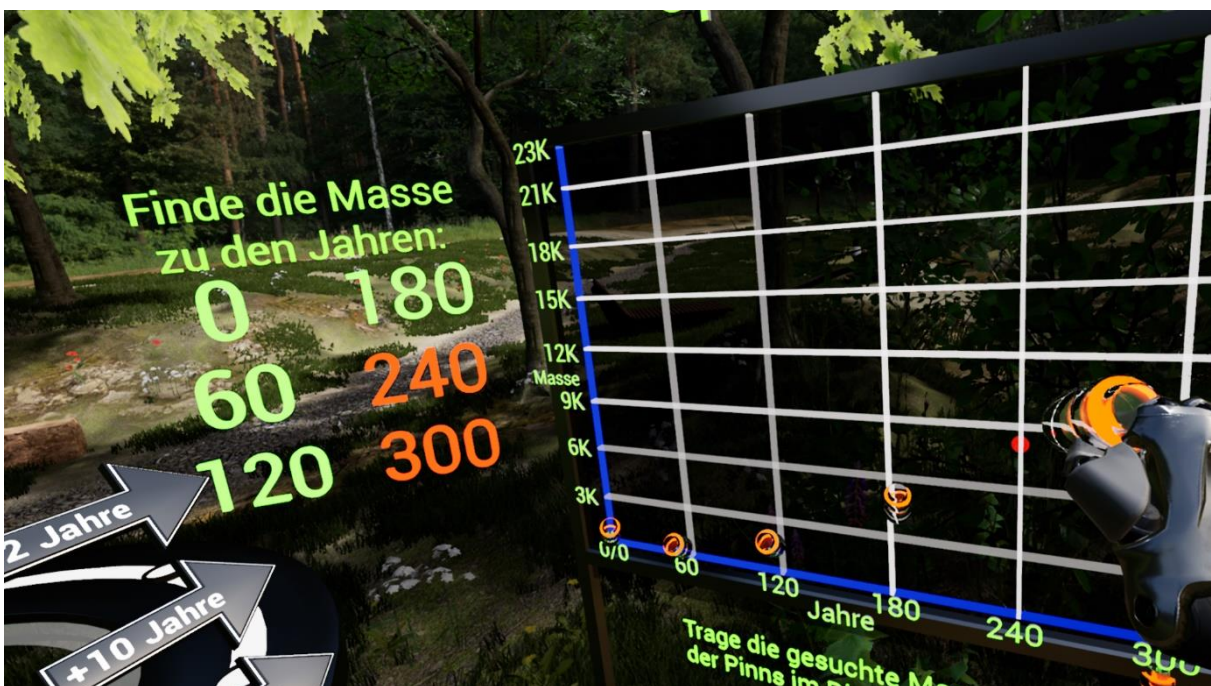


Abbildung 24: Anbringen der Pins am Pinnboard.



Im Anschluss erscheint eine kurze Videosequenz neben der Pinnwand, die die Lernstation in die aktuelle umweltwissenschaftliche Forschung einbettet, sowie vertiefende Informationen zur CO<sub>2</sub>-Bilanz von Wäldern aufzeigt (siehe Abbildung 25).



Abbildung 25: Am Ende des eingeblendeten Videos (hinten rechts), erschienen zusammenfassende Stichpunkte des Inhalts des Videoclips.

In der dritten Lernstation werden dieselben Annahmen bezüglich Verkörperung und Involvement wie für Station eins und zwei getroffen. Für die Mischung aus realitätsfernen und -nahen Interaktionen kann ein negativer Effekt in der Suspension of Disbelief auftreten.

Abschließend zu den Lernstationen folgt nun noch die curriculare Einordnung in die Lehrpläne Chemie und Erdkunde für den Einsatz im Schulunterricht.

### Curriculare Einordnung

Die VR-Lernumgebung wurde fächerübergreifend für die Fächer Chemie und Erdkunde konzipiert. Der Hauptfokus liegt jedoch auf dem Fach Chemie. Verortet wird die evaluierte Lerneinheit in der Sekundarstufe I, Klasse zehn.

Die Bildungsstandards (Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland, 2004) betonen die Wichtigkeit von energetischen Betrachtungen bei Stoffumwandlungen. Dieses Konzept ist grundlegend für das Verständnis chemischer Prozesse und trägt dazu bei, den Schülern ein tieferes Verständnis für die Wechselwirkungen zwischen biologischen und physikalischen Systemen zu vermitteln (ebd.). Der Kohlenstoffkreislauf wird hierfür bundeslandübergreifend den Richtlinien der jeweiligen Lehrpläne entsprechend in den Schulen gelehrt. In dieser VR-Lernumgebung wird er mit zehnten Klassen im Bundesland Rheinland-Pfalz exemplarisch für den bundesweiten Unterricht behandelt.

Die Lernstationen können im Lehrplan für das Fach Chemie zum Thema „Kohlenstoffkreislauf“ im Themenfeld elf „Stoffe im Fokus von Umwelt und Klima“ verortet werden (Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur Rheinland-Pfalz, 2014). Die folgenden Ausführungen beziehen sich alle, sofern nicht anders angegeben, auf den Lehrplan Chemie.

Dieser basiert generell auf den drei Säulen konzeptionelles Fachwissen, Kontextorientierung und Kompetenzentwicklung, welche das Fundament des Lehrplans des Fachs Naturwissenschaften bilden. Daran schließen sich chemiespezifische Leitlinien an, wie etwa die Basiskonzepte, die sogenannten Aspekte der Chemie und der Wechsel zwischen der makroskopischen (Stoff-) und submikroskopischen (Teilchen-) Ebene.

Themenfeld elf ist mit dem Aspekt sechs („Stoffe verantwortungsvoll handhaben“) verknüpft. In diesem Aspekt wird die Verantwortung der Menschheit und deren Umgang mit Stoffen in den Fokus genommen. Hier gibt es zwei Bereiche, in denen Kompetenz entwickelt werden soll. Der Nahbereich zum Beispiel der Umgang mit Gefahrstoffen und deren Auswirkung auf die Gesundheit sowie die globale Verantwortung, um auf der Basis von Fachkenntnissen nachhaltig zu handeln. Die Lernstationen können der globalen Verantwortung zugeordnet werden, da der Kohlenstoffkreislauf sowie die Ausgasung von Kohlenstoffdioxid ein globales Phänomen sind, das von der lokalen Ebene auf andere Orte übertragen werden kann. Kohlenstoffdioxid ist ein wichtiges klimawirksames Gas, das in der Atmosphäre mit Strahlung wechselwirkt und durch natürliche und anthropogene Faktoren beeinflusst wird. Auf der Teilchenebene soll das Verständnis der Wechselwirkung zwischen Teilchen vertieft werden. Die Lernenden sollen lernen, dass Stoffe aus Teilchen bestehen, die sich bewegen und wechselwirken. Die Lernstationen behandeln sowohl die Stoff- als auch die Teilchenebene und ordnen die Ausgasung von Kohlenstoffdioxid in einen globalen Kontext ein. Lernende können so ihre eigenen, einfachen Erklärungsmuster (Präkonzepte) verbessern und weiterentwickeln. Durch wiederkehrende vergleichende Erklärungsmuster werden Basiskonzepte entwickelt, die das Lernen im Fach Chemie erleichtern. Sie ermöglichen die Strukturierung von fachlichem Wissen, das Erkennen von Zusammenhängen und machen dieses Wissen transferfähig. Diese Basiskonzepte sind namentlich die Stoff-Teilchen-Beziehungen, die Struktur-Eigenschaft-Funktion, Wechselwirkung, die chemische Reaktion, Energie, System und Entwicklung. Das Basiskonzept Struktur-Eigenschaft-Funktion ist in Themenfeld elf für die Chemie verpflichtend. Die Basiskonzepte Energie und Wechselwirkung können fakultativ in diesem Themenfeld behandelt werden. So können verschiedene Eigenschaften von Kohlenstoffdioxid und/oder den Ausgasungsvariablen mit den Basiskonzepten verknüpft werden, um globale Prozesse zu verstehen.

Eine weiterführende Verortung wird in den Bildungsstandards der Kultusministerkonferenz (KMK) vorgenommen, welche vom Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland herausgegeben werden (2004). Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich, sofern nicht anders angegeben, auf diese Bildungsstandards. Die Bildungsstandards legen fest, welche fachbezogenen Kompetenzen Lernende bis zu einem bestimmten Abschnitt der Schullaufbahn erworben und entwickelt haben sollten. Da die Lernstationen für und mit der Jahrgangsstufe zehn entwickelt wurden, wird sich auf die Standards für den mittleren Schulabschluss bezogen. Die Bundesländer haben sich verpflichtet, diese Standards anzuerkennen sowie in der Praxis umzusetzen. Dies führte zu einer Anpassung der Lehrplanarbeit, Schulentwicklung und Lehreraus- und -fortbildung, weshalb die bisher vorgenommene Einordnung in den Lehrplan wichtige Elemente der Bildungsstandards wie beispielsweise die Kompetenzbereiche und die Basiskonzepte, bereits berücksichtigt. Kompetenzen sind dort nach Weinert (2001) als für Individuen verfügbare oder erlernbare kognitive Fähigkeiten definiert. Damit verbunden sind motivationale, volitionale und soziale Bereitschaften sowie Fähigkeiten, die dabei helfen, Probleme in variablen Situationen zu lösen (ebd.).

In Themenfeld elf liegen die Schwerpunkte der Kompetenzbereiche in den Bereichen Kommunikation, Erkenntnisgewinnung und Umgang mit Fachwissen. Im Bereich Kommunikation sollen die Lernenden sach- und adressatengerecht präsentieren, als auch Informationen sachgerecht entnehmen können. Im Bereich Erkenntnisgewinnung sollen die Lernenden naturwissenschaftliche Erkenntnisse bzw. den dazugehörigen Erkenntnisprozess reflektieren können. Im Umgang mit Fachwissen sollen sie Fachwissen strukturieren und Erklärungszusammenhänge darstellen können. Die interaktiven Inhalte der einzelnen Lernstationen decken im Speziellen die sachgerechte Entnahme von Informationen, deren Reflexion sowie direkte Anwendung ab und sind somit in den Kompetenzbereichen Erkenntnisgewinnung und Umgang mit Fachwissen zuzuordnen.

Die konzipierten Lernstationen können durch die vielfältigen Interaktionen, die unterschiedliche Informationsbereitstellung (Bild, Text, Audio, Video, Animation) und die kohärente Informationsverknüpfung zu einem Kompetenzgewinn beitragen. Wichtig ist jedoch zu erwähnen, dass eine gute Vor- sowie Nachbereitung des Lernmaterials zur Vertiefung und Ausprägung der Kompetenzen hilfreich ist.

Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich sofern nicht anders angegeben auf den Lehrplan der gesellschaftswissenschaftlichen Fächer Erdkunde, Geschichte, Sozialkunde (2016). Aus den drei Leitkompetenzen (Handlungs-, Orientierungs- und Gestaltungskompetenz) wurden unterrichtsrelevante, allgemeine Kompetenzen für die spezifischen Fächer abgeleitet. Der Fachlehrplan Erdkunde soll die Lernenden dabei unterstützen zu lernen, wie angemessen gehandelt wird, um das eigene Leben sowie den Lebensraum sinnvoll und nachhaltig zu gestalten. Es werden sechs geographische Kompetenzbereiche aufgezeigt, die für die Aneignung der geographischen Gesamtbildung wichtig sind: Fachwissen, Räumliche Orientierung, Erkenntnisgewinnung/Methoden, Kommunikation, Beurteilung/Bewertung und Handlung. Ähnlich zum Lehrplan Chemie besitzt auch Erdkunde Basiskonzepte. Sie werden als Kernideen und Erklärungsansätze fachlichen Denkens angesehen. Sie untergliedern sich in die Konzepte Struktur, Funktion, Prozess und Mensch-Umwelt-System. Sie systematisieren die Reihenfolge der Unterrichtsthemen vertikal über die Klassenstufen hinweg, sodass eine Vernetzung und Förderung von konzeptionellem Lernen stattfinden kann. Ein Beispiel für die erfolgreiche Einbindung der VR-Lernstationen in der zehnten Klasse kann direkt dem Lehrplan entnommen werden.

Klassenstufe	Geographisches Fachverständnis	Räumliche Orientierung	Beispiel: Rhein	Basiskonzepte
9/10	Wechselwirkungen zwischen Umwelt und Aktivitäten des Menschen <b>analysieren</b> und <b>beurteilen</b> sowie Vorschläge für eine nachhaltige Nutzung <b>entwickeln</b>	Topographie, Ordnungssysteme, Kartenkompetenz und <b>Raumwahrnehmung</b> und <b>Raumkonstruktion</b>	Die „Rheinschiene“ und das globalisierte Rheinland-Pfalz	Struktur, Funktion, Prozess und <b>Mensch-Umwelt-System</b>

Abbildung 26: Screenshot aus dem Lehrplan Erdkunde (2016, S. 25) des Bundeslands Rheinland-Pfalz. Ausschnitt aus einem Beispiel zum Aufbau eines geographischen Fachverständnisses am Beispiel des „Rheins“ in verschiedenen Klassenstufen.

Abbildung 26 zeigt den Ausschnitt eines Beispiels zum Aufbau von geographischem Fachverständnis des Lehrplans Erdkunde. Am Beispiel des Rheins kann die Wechselwirkung zwischen

Mensch und Umwelt analysiert und beurteilt werden. Die VR-Lernstationen und ihr Kontext der CO<sub>2</sub>-Ausgasung aus Fließgewässern sowie des Klimawandels und Kohlenstoffkreislaufs können hierfür eine sehr gute Wahl sein, um solche aktuellen Themen mit neuen Medien spannend und interaktiv zu bearbeiten.

Die Fachlehrenden der gesellschaftswissenschaftlichen Fächer sind in jedem Schuljahr dazu angehalten, fächerübergreifende Projekte zu realisieren, die mit den jeweiligen Fachlehrenden der Einzelfächer geplant und umgesetzt werden. Hier bietet es sich an, ein fächerübergreifendes Projekt zum Thema Klimawandel mit dem Fach Chemie zu planen, in welchem die VR-Lernstationen eingesetzt werden können. Erdkunde ist außerdem als methoden- und medienintensives Fach gekennzeichnet, das den Einsatz vielfältiger analoger und digitaler Medien miteinander verbindet. Aktualität, Anschaulichkeit und Sachgerechtigkeit spielen hierbei die übergeordnete Rolle. All dies kann mit dem Einsatz der VR-Lernstationen abgedeckt werden.

Die Lerneinheit adressiert zudem das Sustainable Development Goal (SDG; Ziel für nachhaltige Entwicklung) 13 „Maßnahmen zum Klimaschutz“. Sie leistet dabei einen Beitrag zum Unterziel 13.3 und der damit angestrebten Aufklärung und Sensibilisierung im Bereich der Abschwächung des Klimawandels, der Klimaanpassung und Reduzierung der Klimaauswirkungen (Martens & Ellmers, 2020). Die SDGs sind ein universeller Aufruf der Vereinten Nationen (UN) zum Schutz des Planeten und dessen Lebewesen, die für alle Länder gültig sind (ebd.). Eine stetig wachsende Zahl an Berichten und Datenbanken informiert über globale Fort- und Rückschritte bei der Umsetzung der SDGs (ebd.).



## 4 Methodisches Vorgehen

In den folgenden Kapiteln wird das methodische Vorgehen der Datenerhebung und -auswertung genauer erläutert. In Tabelle zwei werden die wichtigsten Kennwerte in Stichpunkten zusammengefasst.

**Tabelle 2: Zusammenfassung des Skaleneinsatzes, der Modellfit Cut-off Werte sowie der berichteten Effektgrößen und Korrelationen. Literaturangaben sind in den jeweiligen Unterkapiteln zu entnehmen.**

### Datenerhebung und -auswertung

- Eingesetzte Skalen:
  - Fragebogen zur aktuellen Motivation (FAM)
  - Spatial Presence Questionnaire (MEC SPQ)
  - German VR Simulation Realism Scale
  - Wahrgenommene Lerneffektivität
  - VR-Skala
  - Wahrgenommene Bedienbarkeit
- Datenanalyse mit ANOVAs, Pfadanalysen und Korrelationen.
- Modellfit Cut-off Werte:
  - TLI > .9
  - CFI > .95
  - RMSEA < .08
  - SRMR < .08
  - Chi-Quadrat >.05
- ANOVA-Effekte werden berichtet als:
  - $\eta^2 > .02$  als kleiner Effekt
  - $\eta^2 > .13$  als mittlerer Effekt
  - $\eta^2 > .26$  als großer Effekt
- Korrelationen werden berichtet als:
  - Zwischen  $r = .1$  und  $r = .3$  als klein
  - zwischen  $r = .3$  und  $r = .5$  als mittel
  - ab  $r = .5$  als groß

---

Es folgt nun das Vorgehen während der Datenerhebung sowie -auswertung.

## 4.1 Datenerhebung

Die Datenerhebung fand an einem Schulzentrum in Rheinland-Pfalz statt. Erhoben wurde mit  $N = 100$  Teilnehmenden (49 % weiblich, 51 % männlich) aus insgesamt vier zehnten Klassen während dem Schulunterricht in dafür geeigneten Räumen. Die Erhebung fand über einen Schuljahreswechsel hinweg von März bis Dezember 2021 statt. In jedem Schuljahr wurde jeweils mit zwei und damit insgesamt vier zehnten Klassen erhoben. Diese wurden in zwei Gruppen aufgeteilt. Gruppe eins besteht aus den ersten zwei zehnten Klassen und startete mit der Oculus Demo gegen den Neuigkeitseffekt und durchlief Mikrozyklus eins und zwei. Gruppe zwei bestand aus den zweiten zwei zehnten Klassen und startete nach den Sommerferien ebenfalls mit der Demo. Sie durchliefen die Mikrozyklen zwei bis sechs. Aufgrund des erhöhten Bedarfs an Teilnehmenden in Mikrozyklus zwei war es notwendig, dass alle vier zehnten Klassen diesen durchliefen. So konnten sie gleichmäßig auf die drei Unterzyklen verteilt werden und so eine Vergleichbarkeit der Stichprobengrößen gewährleistet werden. In Gruppe eins kam es während der Erhebung zu geringfügigen Schwankungen der Stichprobengröße aufgrund von Schulwechslungen und Krankheiten der Teilnehmenden.

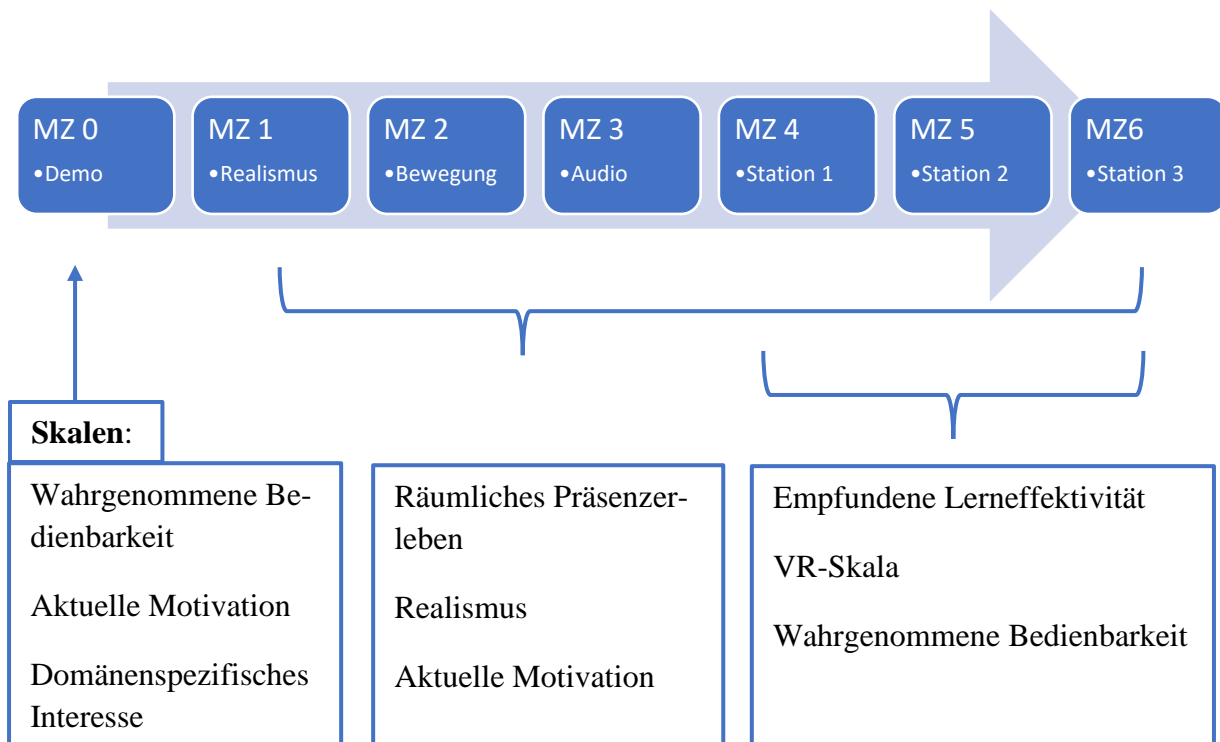


Abbildung 27: Verlauf der Mikrozyklusevaluation mit den jeweils eingesetzten Skalen.

In Abbildung 27 ist die Reihenfolge der Mikrozyklen und der jeweilige Skaleneinsatz zu sehen. Eingesetzt wurden die Skalen: Fragebogen zur aktuellen Motivation (FAM) (Rheinberg et al., 2001), Spatial Presence Questionnaire des Measurements, Effects, Conditions Projekts (MEC SPQ) (Vorderer et al., 2004), German VR Simulation Realism Scale (Poeschl & Doering, 2013), Wahrgenommene Lerneffektivität (X. Zhang et al., 2017), VR-Skala (X. Zhang et al., 2017) und Wahrgenommene Bedienbarkeit (Venkatesh, 2000). In MZ null wurden die Wahrgenommene Bedienbarkeit, die aktuelle Motivation und das domänenspezifische Interesse erhoben. Dies diente dazu, zum einen die Bedienbarkeit und den Umgang mit der VR-Brille zu testen. Zum anderen ist dadurch ein Vergleich der Motivation zwischen der Bearbeitung einer professionell programmierten Demo und der Lernumgebung möglich. Das domänenspezifische

Interesse wurde erhoben, um einen Status quo des generellen Interesses an VR abzufragen, ohne dass bereits mit der Lernumgebung oder der Demo gearbeitet wurde. Die Motivation wurde gemäß dem Einsatzleitfaden von Rheinberg et al. (2001) bevor die Teilnehmenden in die VR eintauchen durften, erhoben. In den Mikrozyklen eins bis sechs wurde das räumliche Präsenzerleben (MEC SPQ), der Realismus und ebenfalls die aktuelle Motivation erhoben. Vom MEC SPQ wurde aufgrund der zeitlichen Limitationen der Erhebung während des Schulunterrichts die Kurzversion mit jeweils vier Items pro Subskala gewählt. Da sich das räumliche Präsenzerleben ebenso wie die Wahrnehmung des Realismus über alle Mikrozyklen der Lernumgebung verändern kann und die aktuelle Motivation einen Einfluss auf das räumliche Präsenzerleben ausübt, werden diese Skalen über alle Mikrozyklen hinweg eingesetzt. In MZ vier bis sechs werden die Skalen Wahrgenommene Lerneffektivität, die VR-Skala sowie die wahrgenommene Bedienbarkeit ergänzt. Die Bedienbarkeit wurde in den MZ eins bis drei ausgesetzt, da es in diesen Zyklen keine Controller für die Teilnehmenden gab und somit nichts bedient werden konnte. In MZ vier mit dem Einsatz der ersten Lernstation änderte sich dies. Die wahrgenommene Lerneffektivität ebenso wie die VR-Skala, haben beide inhaltlich in den Zyklen eins bis drei keine Relevanz und werden erst mit dem Einsatz und der aktiven Bearbeitung von Lernmaterial durch die Teilnehmenden eingesetzt.

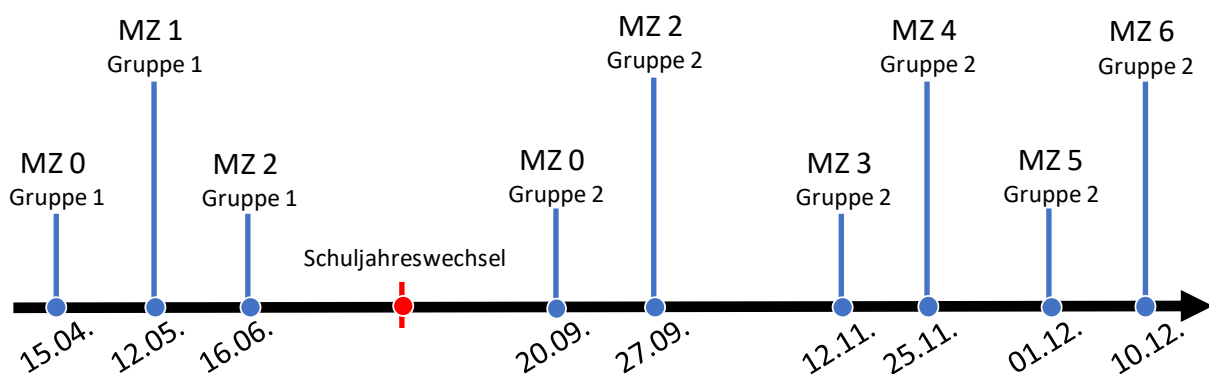
Der MEC SPQ ist eine Skala, die den Entstehungsprozess des räumlichen Präsenzerlebens durch verschiedene Subskalen vollständig theoriebasiert abdeckt und in einem internationalen Projekt konzipiert wurde (Vorderer et al., 2004). Sie hilft, einen vertiefenden und ganzheitlichen Blick auf die Komponenten zu werfen, um die Designentscheidungen differenzierter treffen zu können. Die Realismusskala von Poeschl und Doering (2013) wurde für VR Trainingsanwendungen basierend auf der Witmer-Singer-Presence Skala entwickelt und bietet zusätzlich zum MEC SPQ die Möglichkeit, den Realismus der Szenerie und Umgebung zu erheben. Die Skala der aktuellen Motivation von Rheinberg (2001) gibt einen differenzierten Einblick in die Entstehung der aktuellen Motivation, was vertiefende Rückschlüsse für den möglichen Zusammenhang zwischen und mit den vier Subskalen Interesse, Erfolgswahrscheinlichkeit, Misserfolgsbefürchtung und Herausforderung zulässt. Die VR-Skala und die Skala der wahrgenommenen Lerneffektivität von Zhang et al. (2017) wurden mit dem Zielmedium VR entwickelt und getestet. Ihr Einsatz in den Mikrozyklen der Lernstationen begründet sich damit, dass es die einzigen Zyklen sind, in denen Lernmaterial eingesetzt wird. Beide Skalen behandeln auf unterschiedliche Weise den Umgang mit Lernmaterial in VR und den direkten Zusammenhang zur Motivation und Lerneffektivität. Die VR-Skala untersucht den Zusammenhang zwischen der Manipulierbarkeit der Umgebung und den daraus resultierenden inneren Prozessen, wie etwa Motivationsbildung oder Interessengewinn. Die wahrgenommene Lerneffektivität hingegen behandelt die subjektive Meinung, ob die Arbeit mit dem Lernprodukt die Lerneffektivität steigern kann.

Alle Skalen weisen hohe Reliabilitäts- und Validitätswerte sowie eine gute Dokumentation auf und sind somit für eine Nutzung geeignet. Die VR-Skala sowie die wahrgenommene Lerneffektivität wurden mit der Rückübersetzungsmethodik von darauf spezialisierten, professionellen Übersetzenden übersetzt. Hierbei wird die Skala vom Englischen in die Zielsprache und dann von weiteren Übersetzenden wieder zurück ins Englische übersetzt. So wird die semantische und syntaktische Übereinstimmung zwischen den Versionen geprüft (Herranz-Pascual et al., 2023). Die deutsche Version der Skala Wahrgenommene Bedienbarkeit wurde aus der

Dissertation von Thomas Olbrecht (2010) entnommen. Bei allen anderen Skalen wurden die vorliegenden deutschsprachigen Versionen verwendet. Alle Skalen wurden gemäß ihrer Dokumentation eingesetzt.

Es wäre denkbar gewesen, weitere Skalen einzubeziehen, um mögliche Effekte der emotionalen und kognitiven Faktoren zu messen. Durch die bestehende Länge des Skalenkatalogs und damit verbundenen forschungsethischen Gründen wurde davon jedoch abgesehen. Inhaltlich ist dies erst dringend notwendig, wenn die Lernstationen und der Lernerfolg vertiefend in den Fokus genommen werden.

Erhoben wurden die Daten in den Räumlichkeiten der Schule. Die Einführung der VR-Brille sowie Mikrozyklus eins und der 2x2 Meter Radius in Mikrozyklus zwei fanden in einem Klassenzimmer statt. Die Bereiche 4x4 Meter und 6x6 Meter wurden in der auf dem Schulgelände befindlichen Sporthalle erhoben. Alle weiteren Mikrozyklen wurden aufgrund der benötigten Platzverhältnisse im Aula-Vorraum der Schule durchgeführt. Die Teilnehmenden kamen in Zweiergruppen, da nur zwei VR-Brillen sowie Laptops verfügbar waren. Die Geräte waren betriebsbereit aufgebaut und die Software bereits gestartet. Die Teilnehmenden mussten sich zunächst verschriftliche Arbeitsaufträge durchlesen. Danach wurde der Fragebogen zur aktuellen Motivation ausgefüllt. Nach Fertigstellung durften sie die VR-Brillen aufsetzen und in die Evaluationsumgebung eintauchen. Nach Beenden der in den Mikrozyklen gestellten Aufgaben wurde sofort der Fragebogen zum räumlichen Präsenzerleben ausgefüllt. Daran schlossen sich die übrigen Skalen sowie eine Abfrage der demografischen Daten an. Nach Beenden der Fragebögen sind die zwei Teilnehmenden wieder zurück in den Schulunterricht und haben die nächsten zwei zur Evaluation geschickt. Zur Erhebung wurde das Umfragetool LimeSurvey mit einem Tablet pro Teilnehmendem genutzt.



**Abbildung 28: Zeitstrahl der Startzeitpunkte der Erhebungen der Mikrozyklen mit Gruppenzuweisung. MZ = Mikrozyklus.**

Abbildung 28 zeigt die Startzeitpunkte der Erhebungen der jeweiligen Mikrozyklen mit den jeweiligen Gruppen. Mikrozyklus zwei wurde aufgrund der erforderlichen Stichprobengröße der einzelnen Bewegungsradien mit beiden Gruppen erhoben (siehe Kapitel 3.1). Erhoben wurde an 33 Erhebungstagen jeweils vormittags von 7:45 bis 13:00. Das verdeutlicht den Aufwand, der bedacht werden muss, wenn ein Design-Based Research Projekt geplant und auf Machbarkeit geprüft wird. Durch die Erhebung während der Corona Pandemie kam es vor, dass manche Teilnehmende aus diversen Gründen einige Wochen ausfielen und somit zusätzliche Erhebungstage eingeplant werden mussten, damit alle die Mikrozyklen in der richtigen Reihenfolge durchlaufen.

## 4.2 Datenauswertung

Die quantitative Auswertung der Daten der LimeSurvey Fragebögen wurde im Statistikprogramm R durchgeführt. Errechnet wurden Varianzanalysen (ANOVA) aller Skalen sowie Pfadanalysen der Skala des räumlichen Präsenzerlebens.

Als Literaturquelle zur nachfolgenden Erläuterung der Funktionsweise und Anwendung von ANOVAs wird, sofern nicht anders angegeben, das Kapitel elf „Unterschiede zwischen mehr als zwei Gruppen: die Varianzanalyse“ aus dem Werk Methodenlehre und Statistik von Schäfer (2016c) herangezogen. Die ANOVA ist ein statistisches Verfahren, mit dem es ermöglicht wird, die Unterschiede zwischen mehr als zwei Mittelwerten zu untersuchen. Im Gegensatz zum  $t$ -Test mit dem nur zwei Mittelwerte verglichen werden können, sind mit der ANOVA drei oder mehr möglich. Angeführt wird als Beispiel, wie die Reaktion eines Zuhörenden bei einem Vortrag untersucht werden kann. Indem die Variablen des Vortrags wie Lautstärke, Schriftgröße, Ausdrucksweise manipuliert und vergleichend untersucht werden, kann herausgefunden werden, ob diese Änderungen positive Reaktionen beim Zuhörenden hervorrufen. Als Ausprägung von Ursache und Erklärung kann immer eine Vielzahl von Variablen relevant sein. Mit der Varianzanalyse wird inferenzstatistisch nach der wichtigsten Quelle, also der verursachenden Variable, gesucht, die die Varianz verursacht. Die Gesamtvarianz kann in die between- und within-Varianz aufgeteilt werden. Unterscheiden sich die Mittelwerte zwischen drei oder mehr Gruppen wird von der sogenannten Varianz zwischen den Gruppen (between-Varianz) gesprochen. Es stellt den Teil der Varianz dar, der durch die Manipulation erklärt werden kann. Um die Gesamtvarianz zu verstehen, ist auch die Varianz innerhalb der Gruppen (within-Varianz) relevant. Sie wird dadurch erklärt, dass jeder Mensch in seinen Merkmalsausprägungen verschieden ist und dadurch nicht denselben Messwert liefern kann. Diese Varianz ist zufällig und kann nicht erklärt werden. Die ANOVA prüft unter anderem das Verhältnis von between und within-Varianz, im  $F$ -Wert. Je kleiner die Varianz innerhalb der Gruppen beziehungsweise, je größer die Varianz der Mittelwerte zwischen den Gruppen ist, desto größer fällt der  $F$ -Wert aus. Wenn die Varianz der Mittelwerte zwischen den Gruppen groß genug ist, wird das Ergebnis signifikant. Dies wird durch den  $p$ -Wert angegeben.

Der  $p$ -Wert beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass der gefundene oder ein noch größerer Effekt vorherrscht, unter der Annahme, dass die Nullhypothese gilt (T. Schäfer, 2016b). Er testet damit, ob die Mittelwertunterschiede zwischen den Gruppen signifikant sind (ebd.). Die Nullhypothese geht davon aus, dass in den erhobenen Werten kein Effekt (zum Beispiel ein Zusammenhang oder Unterschied), besteht (ebd.).

Zusätzlich können Konfidenzintervalle (englisch: Confidence interval, CI) herangezogen werden. Konfidenzintervalle haben zwei Grenzen, die basierend auf dem Mittelwert, dem Standardfehler und der entsprechenden Verteilung (zum Beispiel Standardnormalverteilung) berechnet werden (ebd.). Es gibt keinen Aufschluss darüber, mit welcher Wahrscheinlichkeit der wahre Parameterwert (zum Beispiel der errechnete Mittelwertunterschied) innerhalb des Intervalls liegt (ebd.). Stattdessen wird das Konfidenzniveau genutzt. Es ist eine festgelegte Wahrscheinlichkeit, die angibt, dass bei einer großen Anzahl von Wiederholungen dieses Verfahrens ein festgelegter Prozentsatz dieser Konfidenzintervalle den wahren Wert des Parameters enthalten wird (ebd.). Der wahre Parameterwert ist der tatsächliche, aber unbekannt Wert, dem mit der Berechnung eines geschätzten Wertes aus den vorhandenen Daten versucht wird, möglichst nahezukommen (ebd.). Zum Beispiel bedeutet ein Konfidenzniveau von 95 %, dass bei

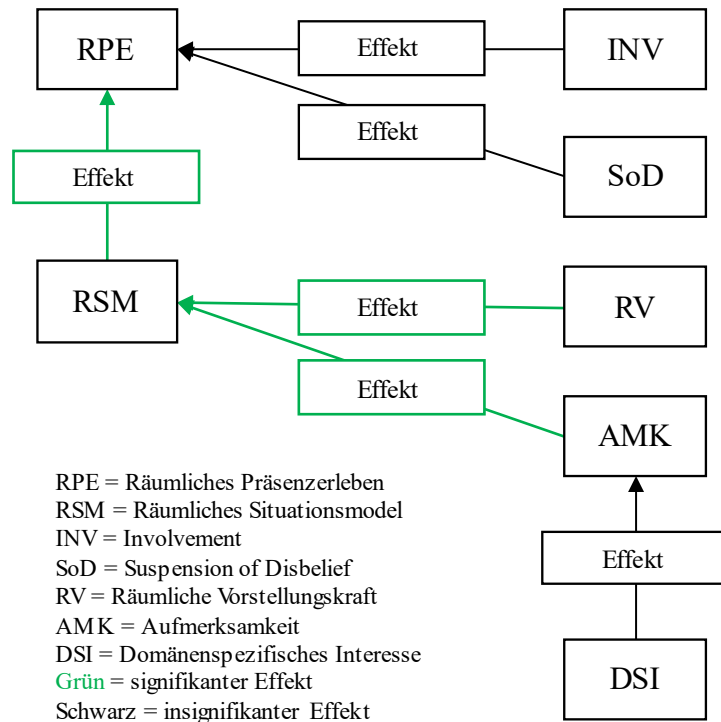
wiederholter Berechnung von Konfidenzintervallen in etwa 95 % der Fälle der wahre Wert des Parameters innerhalb des Intervalls liegt. Das Intervall selbst ist eine Schätzung und gibt einen Bereich an, innerhalb dessen der wahre Wert des Parameters mit hoher Wahrscheinlichkeit liegt (ebd.). Der wahre Parameterwert kann nur in seltenen Fällen errechnet werden, da in Forschungsvorhaben meist nur eine begrenzte Stichprobe an Daten vorhanden ist (Müller-Benedict, 2011). Das Konfidenzintervall dient als Maß für die Schwankungsbreite um den geschätzten Wert und gibt einen Bereich an, in dem wir mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (dem Konfidenzniveau) den wahren Wert des Parameters vermuten können (ebd.).

Es wurden für alle Variablen des MEC SPQ sowie die Skalen Realismus, FAM, Wahrgenommene Lerneffektivität, VR-Skala, Wahrgenommene Bedienbarkeit über alle Messzeitpunkte, in denen sie eingesetzt wurden, solche Analysen durchgeführt. Angegeben werden in den Ergebnissen die *F*- sowie *p*-Werte, als auch die Konfidenzintervalle.

Zusätzlich wurde das generalisierte Eta-Quadrat ( $\eta^2$ ) errechnet. Eta-Quadrat wird in der ANOVA-Literatur üblicherweise als Effektgrößenstatistik bezeichnet. Es quantifiziert den Anteil der Varianz in der abhängigen Variable, der auf die unabhängige Variable zurückgeführt werden kann und bezeichnet das Verhältnis von Effekt zu Gesamtvarianz (Bakeman, 2005). Je höher der Wert von Eta-Quadrat, desto stärker der Effekt der unabhängigen Variable auf die abhängige Variable (T. Schäfer, 2016c). Das generalisierte Eta-Quadrat ist der Quotient der erklärten Varianz zur Gesamtvarianz. Es wird das generalisierte Eta-Quadrat, also die Gesamtwirkung von unabhängigen Variablen, errechnet. Das generalisierte Eta-Quadrat wird mit  $\eta^2 > .02$  als kleiner Effekt  $\eta^2 > .13$  als mittlerer Effekt und  $\eta^2 > .26$  als großer Effekt ausgewiesen (ebd.).

Zur vertiefenden Analyse der Bildung des räumlichen Präsenzerlebens mit dem MEC SPQ wurden nach jedem Mikrozyklus zusätzlich Pfadanalysen mit den erhobenen Daten errechnet. Werden mehrere Regressionsmodelle verknüpft, resultiert daraus eine Modellierung, die als Pfadanalyse bezeichnet wird (J. Reinecke & Pöge, 2010). Wichtig hierbei ist, die Pfadanalyse in den Kontext der Strukturgleichungsmodelle (englisch: Structural Equation Model, SEM) einzuordnen. Das SEM bietet Untersuchungsfunktionen, die über die Pfadanalyse hinaus möglich sind und ist eine Weiterentwicklung der Pfadanalyse. Es sind multivariate Methoden zur Prüfung von Hypothesen über die Einflüsse zwischen Variablen (Harrison et al., 2007). Sie kombinieren die statistischen Verfahren der Regression und der konfirmatorischen Faktorenanalyse (Riha et al., 2021). Strukturgleichungsmodelle werden vorwiegend in Wissenschaftsbereichen eingesetzt, die größere Datenmengen produzieren und quasi-experimentelle oder nicht-experimentelle Forschungsdesigns einsetzen (J. Reinecke & Pöge, 2010). Mit dem Verfahren der SEM ist es möglich, zwischen einer Mess- und einer Strukturebene zu unterscheiden, um gemessene und nicht-gemessene Variablen zu untersuchen (ebd.). Es wird zwischen zwei Variablentypen unterschieden: manifesten und latenten Variablen. Manifeste Variablen sind direkt beobachtbar, während latente Variablen nicht-beobachtbar sind (Arzheimer, 2016). Die Messebene umfasst die manifesten Variablen, die als Indikatoren der latenten Variablen dienen (Morrison et al., 2017). Die Strukturebene beschreibt die Beziehungen zwischen den latenten Variablen und wie sie im Pfaddiagramm dargestellt werden (ebd.). Während bei der Pfadanalyse nur die direkten Pfade und Zusammenhänge zwischen den Variablen auf der Strukturebene betrachtet werden, werden beim komplexeren Verfahren des Strukturgleichungsmodells auch indirekte Effekte sichtbar gemacht (ebd.). Es ist das Forschungsdesign und die Stichprobengröße, die

darüber entscheiden, im welchem Umfang Vermutungen über kausale Zusammenhänge im Modell geprüft und erklärt werden können (Arzheimer, 2016). SEMs erfordern im Gegensatz zu Pfadanalysen sehr große Stichprobengrößen (200+), um die Berechnung von komplexen Modellen ohne technische Probleme und mit robusten Ergebnissen durchführen zu können (Kline, 2016). Durch die reduzierte Komplexität des Modells bei der Pfadanalyse und der in dieser Studie vorhandenen Stichprobengröße ist der Einsatz der Pfadanalyse gerechtfertigt und die Ergebnisse unter Berücksichtigung der Stichprobengröße interpretierbar. Es wird eine Pfadanalyse der direkten Pfade zwischen den Variablen vorgenommen und untersucht, welchen Einfluss die einzelnen Variablen im Prozessmodell von Vorderer et al. (2004) bei der Bildung von räumlichem Präsenzerleben in den jeweiligen Mikrozyklen haben. Es wird somit auf die weiterführenden Analysemethoden des SEM verzichtet. Die für die Mikrozyklen identifizierten Komponenten und deren Einfluss auf das Präsenzerleben können so genauer untersucht werden. Die Beziehungen zwischen den Variablen werden in der Pfadanalyse als linear angenommen (Bortz & Schuster, 2010). Es lassen sich auch latente Variablen erfassen, was die Einsatzfähigkeit des Verfahrens erweitert (ebd.). Dargestellt werden die Ergebnisse einer Pfadanalyse in einer grafischen Repräsentation eines linearen Gleichungssystems, dem sogenannten Pfaddiagramm (Arzheimer, 2016). Zunächst werden Pfadkoeffizienten geschätzt, um das Pfadmodell an empirische Daten anzupassen (ebd.). Die Pfadkoeffizienten beschreiben die Größe der Effekte einer Variable auf eine andere und sind die direkten Effekte (ebd.). Die Anpassung des Modells wird daraufhin an den erhobenen Daten geprüft und eine Anpassungsgüte beobachtet, die aussagt, ob das Modell als evident gültig betrachtet wird (ebd.). Wichtig hierbei ist zu erwähnen, dass nur weil ein Modell gut an Daten angepasst wurde und damit gültig ist, es nicht automatisch als bewiesen gilt und Kausalitäten damit nachgewiesen werden können (Bortz & Schuster, 2010). Viel mehr steht die Überprüfung von inhaltlichen Überlegungen zu Modellen durch empirische Daten im Vordergrund (ebd.). Dies wird durch die aufeinander aufbauenden Mikrozyklen und die erwarteten Zusammenhänge im Prozessmodell des räumlichen Präsenzerlebens vorgenommen. Das Prozessmodell des räumlichen Präsenzerlebens kann als hierarchisches Pfadmodell kategorisiert werden. Der kausale Wirkpfad verläuft nur in eine Richtung (siehe Abbildung 29) und die Variablen beeinflussen sich nicht wechselseitig (ebd.).



**Abbildung 29: Darstellung der Wirkpfade in einem Pfaddiagramm des Prozessmodells des räumlichen Präsenzerlebens mit allen Variablen. Grün markiert sind mögliche signifikante und schwarz insignifikante Effekte.**

Um zu prüfen, ob die erhobenen Daten zum vorgesehenen Modell passen, muss ein sogenannter Modellfit geprüft werden. Er ist das Ausmaß der Übereinstimmung des statistischen Modells und der erhobenen Daten (Nerdinger et al., 2019). Für einen guten Modellfit bei einer Pfadanalyse gibt es verschiedene Kennwerte, die zur Bewertung herangezogen werden können. Der Chi-Quadrat-Test zeigt die Abweichung zwischen den beobachteten Daten sowie den vorhergesagten Daten des Modells auf und deutet als nicht signifikanter Wert auf einen guten Modellfit hin (Morrison et al., 2017). Allerdings ist der Chi-Quadrat-Test gegenüber großen Stichproben ( $N > 400$ ) sensibel, sodass selbst gute Modelle statistisch signifikant von der Kovarianzmatrix abweichen (Berning, 2019). Deshalb müssen weitere Fit-Indizes hinzugezogen werden, wie zum Beispiel inkrementelle und absolute (Morrison et al., 2017). Inkrementelle Fit-Indizes beschreiben das Gütemaß zwischen 0 und 1, wobei 0 das schlechteste und 1 ein perfektes Modell darstellt (Berning, 2019). Als bekannteste inkrementelle Fit-Indizes werden der Tucker Lewis Index (TLI) sowie der Comparative Fit Index (CFI) genannt (ebd.). Für einen guten Modellfit werden Werte des TLI von größer als .9 und CFI größer als .95 angesehen (ebd.). Je komplexer das Modell ist, desto schlechter fallen in der Regel der TLI und der CFI aus (ebd.). Deshalb kann es ratsam sein, vorwiegend absolute Fit-Indizes zu betrachten. Absolute Fit-Indizes beschreiben die Abweichung von einem perfekten Modell, wobei ein größerer Wert mit einem schlechten Modellfit in Verbindung gebracht wird (ebd.). Der Root Mean Square Error of Approximation (RMSEA) gilt mit einem Wert kleiner gleich .08 als akzeptabel (ebd.). Der Standardized Root Mean Square Residual (SRMR) wird mit kleiner .08 als gut angesehen (ebd.). Diese Werte werden auch als sogenannte Cut-off Werte bezeichnet, wobei es vermieden werden sollte, diese einfach blind als gegeben anzusehen (Morrison et al., 2017). In einer Untersuchung von McNeish et al. (2018) wurde herausgefunden, dass, wenn die Messqualität der



Items höher ist, tendenziell schlechtere Modelfit-Werte erzeugt werden. Daraus lässt sich schließen, dass die Modelfit-Werte ein Indikator sind, wie gut die Daten an das Modell angepasst sind, aber schlechtere Werte kein Ausschlusskriterium sein müssen. Modelle mit schlechten Modelfit-Werte können unter der Berücksichtigung derselben trotzdem interpretiert werden (Berning, 2019). Ein guter Modelfit bedeutet nicht, dass das Modell valide ist, da auch unsinnige Zusammenhänge einen akzeptablen Modelfit erzeugen können (ebd.). Es bedeutet, dass das Modell mögliche Zusammenhänge noch nicht richtig darstellt und ein Blick auf die Modifikationsindizes geworfen werden sollte (ebd.). Modifikationsindizes sind Angaben, wie stark die Parameter des Modelfit-Werte durch Hinzufügen oder Entfernen von Pfaden beeinflusst werden. Modelloptimierung sollte immer theoretisch fundiert erfolgen und nicht ausschließlich über die Modifikationsindizes, da sonst die Gefahr besteht, Strukturen in den erhobenen Daten zu suchen, um das Modell daran anzupassen (ebd.). Auch durch Hinzufügen von Optimierungen anhand der Modifikationsindizes können unsinnige Zusammenhänge entstehen. In der Praxis ist es nicht ungewöhnlich, dass ein schlecht passendes Modell auf die vorhandene Datenstruktur angepasst wird (Kaplan, 2001). Es wird dann im Nachgang argumentiert, wie die Änderung in die theoretische Rahmung passt (ebd.). Dies wird in dieser Arbeit nicht vorgenommen, da die Effekte innerhalb des Prozessmodells ohne Anpassung an vorhandene Datenstrukturen theoriebasiert untersucht werden sollen.

Aufgrund der geringen Stichprobengröße wurden die Pfadanalysen mit einem Bootstrap von 10,000 durchgeführt und die standardisierten Werte berichtet. Bootstrapping ermöglicht es, die Robustheit der Ergebnisse zu erhöhen, um zuverlässigere statistische Aussagen über Modellparameter zu treffen (Haukoos & Lewis, 2005). Es werden aus der vorhandenen Stichprobe wiederholt neue Stichproben durch Ziehen mit Zurücklegen generiert. Solange, bis wir eine neue Stichprobe erhalten, die genauso groß ist wie die ursprüngliche. Für jede Bootstrap-Stichprobe wird ein neuer Satz Parameterschätzungen generiert. Die Parameterschätzungen der Bootstrap-Stichproben können Mittelwerte, Standardfehler und die Konfidenzintervalle enthalten sowie alle daraus berechenbaren Werte (ebd.). Es verhilft so auch die Robustheit der Ergebnisse zu erhöhen, um robustere statistische Aussagen über die Modellparameter zu treffen (Vahdat & Shashaani, 2021). Bei verhältnismäßig kleineren Stichproben hilft Bootstrapping dabei, Verteilungsannahmen zu entschärfen, die bei statistischen Tests und Schätzungen erforderlich sind, wie dass die Stichprobe einer Normalverteilung folgt (Goretzko & Bühner, 2022). Die Schätzung von Strukturgleichungsmodellen bzw. Pfadanalysen mit latenten Variablen wird klassischerweise mit dem Maximum Likelihood (ML) Verfahren durchgeführt, welche solche Voraussetzungen wie die Normalverteilung besitzt (Klingler, 2014).

Die Voraussetzungen der statistischen Testverfahren an die Daten wurden vor der Berechnung geprüft. So wurde z.B. die Normalverteilung mithilfe des Shapiro-Wilk-Tests als auch mit der optischen Betrachtung durch Q-Q-Plots geprüft. Für die ANOVAs wurden Levene-Tests errechnet, die die Varianzen der Messwerte (Varianzhomogenität) überprüften. Bei Varianzheterogenität, also einem signifikanten Levene-Test wurde die Welch's ANOVA mit dem Games-Howell-Post-hoc-Test genutzt, welche keine homogenen Varianzen voraussetzt. Bei nicht signifikantem Levene-Test wurde der Tukey-Post-hoc-Test genutzt. Generell gilt zu sagen, dass ANOVAs relativ robust gegenüber Verletzungen der Voraussetzungen sind und nur bei starken Verzerrungen der F-Wert nicht berechnet werden sollte (T. Schäfer, 2016c). Die Daten wurden optisch über Boxplots auf Ausreißer geprüft, da sie Rohdaten unverzerrt darstellen können und

deshalb dafür eine gute Option darstellen (T. Schäfer, 2016c). Ausreißer stellen Werte dar, die die nicht den allgemeinen Erwartungen entsprechen (ebd.). Sie können auf verschiedene Ursachen, wie zum Beispiel Messfehler oder einfache Extremwerte, zurückgeführt werden (Backhaus et al., 2021). Das Entfernen von Ausreißern aus den Daten, ohne ersichtliche Begründung oder Rückführung auf Fehlerquellen die sich außerhalb des Forschungskontextes befinden, kann zu einer Verzerrung der Ergebnisse führen, die Genauigkeit der Analyse beeinträchtigen und eine Manipulation der Ergebnisse darstellen (Backhaus et al., 2021). In den vorhandenen Datensätzen sind kaum Ausreißer vorhanden und es handelt sich meist nur um geringe Ausreißer deren Abstand mehr als den 1,5-fachen, jedoch weniger als den 3-fachen Interquartilsabstands beträgt. Diese vorhandenen Ausreißer werden in den Datensätzen behalten und dienen der Glaubwürdigkeit und Vollständigkeit der Daten.

Zusätzlich wurden Korrelationsmatrizen sowie die dazugehörigen  $p$ -Werte zwischen den Mittelwerten der erhobenen Subskalen der Mikrozyklen errechnet, in denen die Werte erhoben wurden. Korrelationen sind die Darstellung wie stark der lineare Zusammenhang zwischen zwei Variablen ist (T. Schäfer, 2016a). Dies wird auch bivariater Zusammenhang beziehungsweise bivariate Korrelation genannt (ebd.). In einem Korrelationsplot werden die signifikanten Korrelationen inklusive  $r$ -Werte dargestellt. Die Korrelationen werden nach Cohen (1988) zwischen  $r = .1$  und  $r = .3$  als klein, zwischen  $r = .3$  und  $r = .5$  als mittel und ab  $r = .5$  als groß bezeichnet. Korrelationen sind wichtig, um mögliche Zusammenhänge der Variablen des Präsenzmodells und den zusätzlich erhobenen zu analysieren. Die Darstellung der komplexen Theorie und die darin verankerten Zusammenhänge in dieser Arbeit gehen über das Präsenzmodell hinaus und erfordern eine genaue Analyse, um theoretische Annahmen zu prüfen.

Aufbauend auf den empirischen Ergebnissen der ANOVAs, Korrelationsrechnungen, der Pfadanalysen sowie den zugrunde liegenden Theorien dieser Studie werden weiterführende Überlegungen und darauf begründete Modellrechnungen vorgenommen, die das Modell unter dem Aspekt des Designs von VR-Lernumgebungen neu betrachten, sodass darauf aufbauende Annahmen zur Bildung des Präsenzerlebens in VR-Lernumgebungen angestoßen werden können. Dies geschieht jedoch erst in der Diskussion, weil diese Annahmen nicht initial getätigt wurden, sondern im Zuge der Auswertung entstanden.

Für die qualitativen Daten der Freitextfragen im Fragebogen, um individuelle Rückmeldungen zu analysieren, war je nach Datenlage eine qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2019) geplant. Es stellte sich jedoch bei der Sichtung der Rückmeldungen heraus, dass diese so wenig sind, dass eine dezidierte Auswertungsmethode nicht notwendig war. Die wenigen qualitativen Rückmeldungen werden in der Ergebnisdarstellung nach Inhalt sortiert und tabellarisch gelistet, sofern eine Sortierung aufgrund der Anzahl sinnvoll ist.

## 5 Ergebnisse

Die Konzeption der Mikrozyklen orientiert sich an den Einflüssen, die auf das räumliche Präsenzerleben einwirken und im Kontext von immersivem Lernen stehen (siehe Kapitel 3.1). Die Faktoren Neuigkeitseffekt, Realismus (visuelle Darstellung), Bewegungsradius, auditive Reize der Umgebung sowie verschiedene Interaktionsmöglichkeiten wurden zur Untersuchung identifiziert. Diese Faktoren sind sowohl für immersives Lernen, räumliches Präsenzerleben und Authentizität der Lernumgebung maßgeblich. Die Mikrozyklen sind so konzipiert, dass die Einflüsse ausgehend von der Evaluierung der basalen Grundfläche bis hin zu kompletten Lernstationen aufbauend aufeinander durchgeführt und evaluiert werden können. Es wird angestrebt, ein höchstmögliches Präsenzerleben zu erzeugen. Im Folgenden werden die Ergebnisse aller Skalen über die Mikrozyklen eins bis sechs betrachtet. Dies stellt die Basis der nachfolgenden Analyse der einzelnen Mikrozyklen dar, in denen auf die Skalenwerte der jeweiligen Messzeitpunkte verwiesen wird. Die Mikrozyklen werden mit Pfadanalysen genauer analysiert. Zunächst werden dort die soziodemografischen Daten der Teilnehmenden dargestellt. Daraufhin wird die Konzeption erläutert und der gegebene Arbeitsauftrag präsentiert. Anschließend werden die Ergebnisse der Pfadanalysen berichtet, diskutiert und der jeweilige Handlungsbedarf zur Überarbeitung des jeweiligen oder zur Konzeption des folgenden Mikrozyklus abgeleitet.

### 5.1 ANOVA Auswertung

Nachfolgend werden die Auswertungen aller Subskalen über alle Messzeitpunkte hinweg dargestellt. Es werden die Subskalen des räumlichen Präsenzerlebens (MEC SPQ) und der aktuellen Motivation (FAM) analysiert sowie die Skalen Realismus, wahrgenommene Bedienbarkeit, wahrgenommene Lerneffektivität und die VR-Skala. Es werden Diagramme mit eingetragenen Signifikanzen der Post-hoc-Tests und Standardabweichungen, als auch tabellarische Listungen der Post-hoc-Ergebnisse und die gefundenen Effekte angeführt.

## Räumliches Präsenzerleben (MEC SPQ)

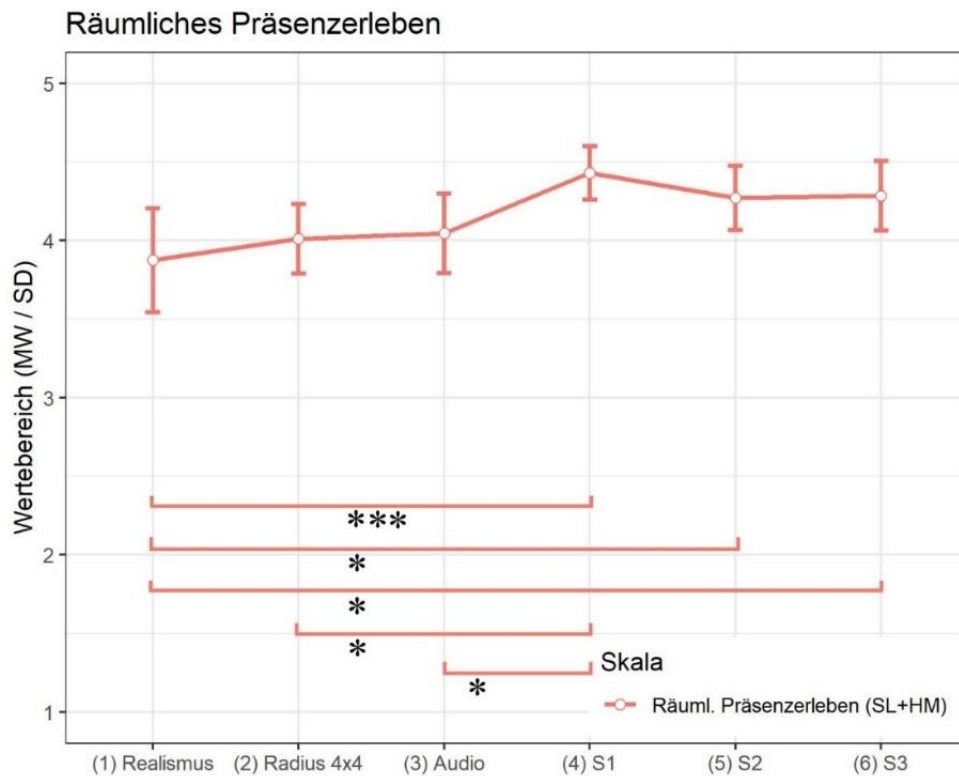


Abbildung 30: Skala Räumliches Präsenzerleben. Kumuliert aus den Skalen Selbstlokation und Handlungsmöglichkeiten.

Das räumliche Präsenzerleben setzt sich aus den Subskalen Selbstlokation und Handlungsmöglichkeiten zusammen, die in Abbildung 30 zusammen als räumliches Präsenzerleben dargestellt sind. Der Ausgangswert der Präsenzerfahrung ist bereits sehr hoch, steigt über die Mikrozyklen zwei und drei deskriptiv an und erreicht seinen Höhepunkt bei Lernstation eins (S1). Insgesamt zeigt sich ein kleiner Effekt:  $F(5,270) = 5.639, p < .001, \eta_G^2 = .095$ .

Die Werte des Tukey-Test (post-hoc) lauten wie folgt:

Tabelle 3: Tukey-Test: Räumliches Präsenzerleben.

Zyklus 1	Zyklus 2	Konfidenzintervall	p-Wert	Signifikanz
(1) Realismus	(4) S1	CI [0.20, 0.91]	$p < .001$	***
(1) Realismus	(5) S2	CI [0.04, 0.75]	$p = .02$	*
(1) Realismus	(6) S3	CI [0.06, 0.76]	$p = .01$	*
(2) Radius 4x4	(4) S1	CI [0.04, 0.8]	$p = .02$	*
(3) Audio	(4) S1	CI [0.38, 0.73]	$p = .02$	*

## Selbstlokation (MEC SPQ)

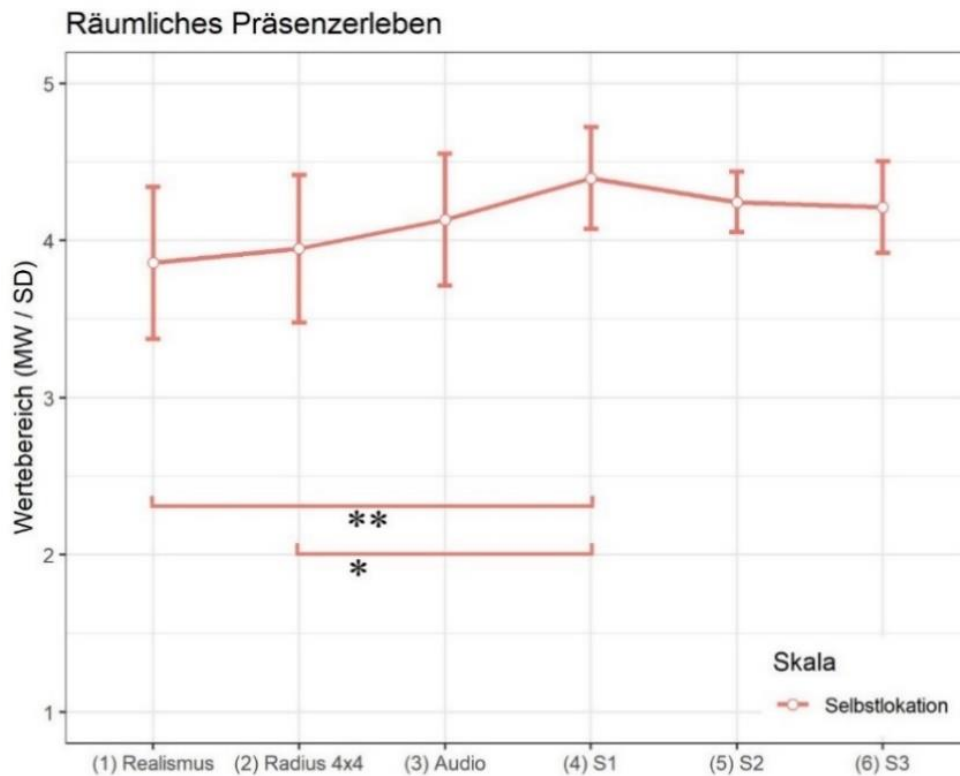


Abbildung 31: Skala Selbstlokation des MEC SPQ.

Die Selbstlokation startete mit einem bereits hohen Wert und stieg bis Lernstation eins (S1) weiter an, wo der Wert den Höhepunkt der Erhebung erreichte. Insgesamt wurde ein kleiner Effekt erzielt:  $F(5,270)=3.821, p = .002, \eta^2 = .067$ .

Die Werte des Tukey-Test (post-hoc) lauten wie folgt:

Tabelle 4: Tukey-Test: Selbstlokation.

Zyklus 1	Zyklus 2	Konfidenzintervall	<i>p</i> -Wert	Signifikanz
(1) Realismus	(4) S1	CI [0.14, 0.94]	$p = .02$	**
(1) Radius 4x4	(5) S1	CI [0.01, 0.89]	$p = .04$	*

## Handlungsmöglichkeiten (MEC SPQ)

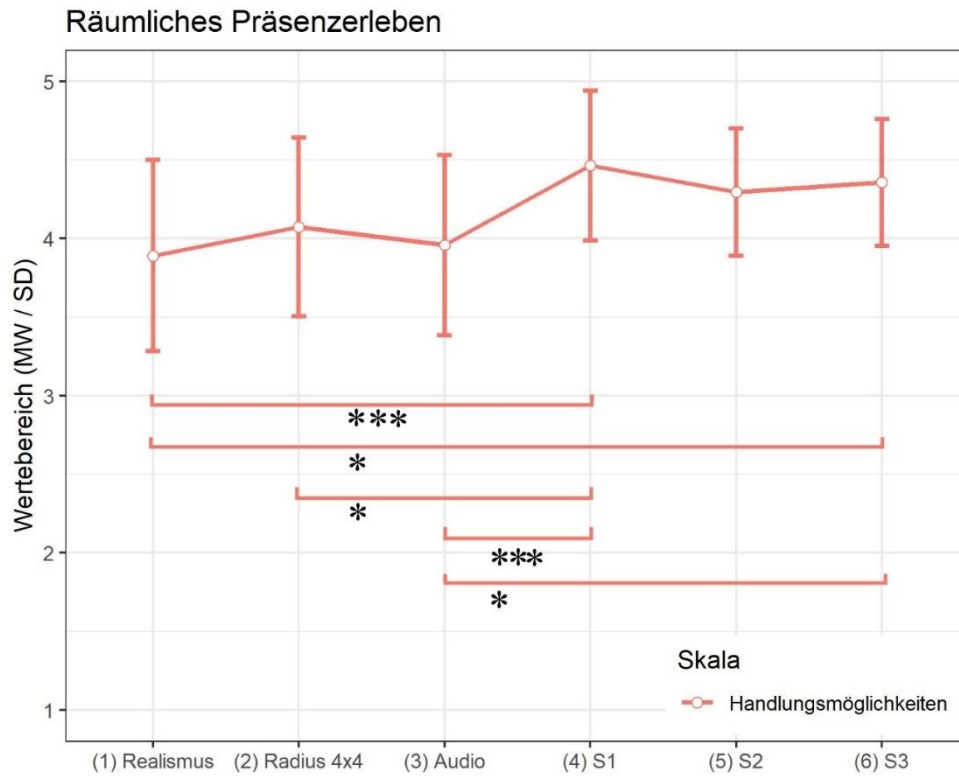


Abbildung 32: Skala Handlungsmöglichkeiten des MEC SPQ.

Die Werte der Handlungsmöglichkeiten starteten mit einem im Mittel bereits hohen Wert und stiegen sprunghaft bei Lernstation eins (S1) an. In dieser Auswertung wurde der Levene-Test signifikant ( $F(5,2.95)$ ,  $p = .014$ ) weshalb die Welch-ANOVA zur weiteren Analyse genutzt wurde. Insgesamt wurde ein mittlerer Effekt erzielt:  $F(5,121.01) = 6.84$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .22$ .

Durch die Nutzung des Welch-ANOVA werden die Ergebnisse mit dem Games-Howell-Test (post-hoc) analysiert:

Tabelle 5: Games-Howell-Test: Handlungsmöglichkeiten.

Zyklus 1	Zyklus 2	Konfidenzintervall	p-Wert	Signifikanz
(1) Realismus	(4) S1	CI [0.19, 0.96]	$p < .001$	***
(1) Realismus	(6) S3	CI [0.07, 0.87]	$p = .01$	*
(2) Radius 4x4	(4) S1	CI [0.03, 0.75]	$p = .03$	*
(2) Audio	(4) S1	CI [0.15, 0.86]	$p < .001$	***
(3) Audio	(6) S3	CI [0.03, 0.77]	$p = .03$	*

## Räumliches Situationsmodell (MEC SPQ)

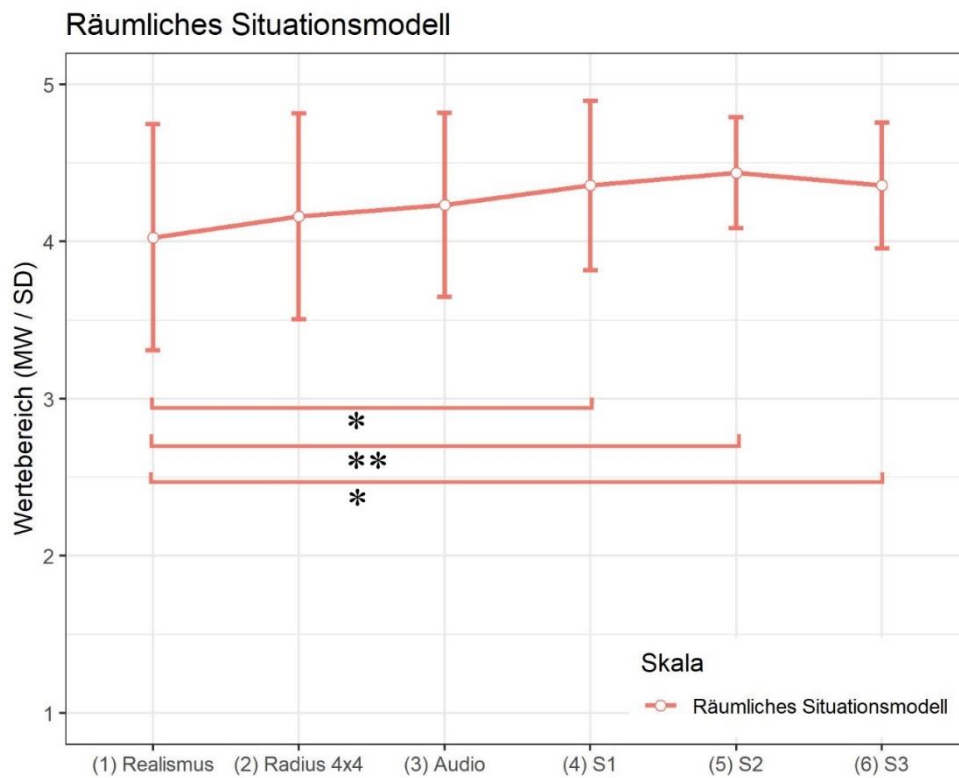


Abbildung 33: Skala Räumliches Situationsmodell des MEC SPQ.

Die Werte des räumlichen Situationsmodells, d.h. der ersten Ebene für die Ausbildung des räumlichen Präsenzerlebnisses, weisen bereits ab Mikrozyklus eins sehr hohe Werte auf, die bei deskriptiver Betrachtung fast linear bis zur Station zwei ansteigen. Insgesamt ergab sich ein kleiner Effekt ( $F(5,270) = 4.134, p = .001, \eta_G^2 = .071$ ).

Die Werte des Tukey-Test (post-hoc) lauten wie folgt:

Tabelle 6: Tukey-Test: Räumliches Situationsmodell

Zyklus 1	Zyklus 2	Konfidenzintervall	p-Wert	Signifikanz
(1) Realismus	(4) S1	CI [0.03, 0.63]	$p = .02$	*
(1) Realismus	(5) S2	CI [0.11, 0.71]	$p = .001$	**
(1) Realismus	(6) S3	CI [0.03, 0.63]	$p = .02$	*

## Involvement (MEC SPQ)

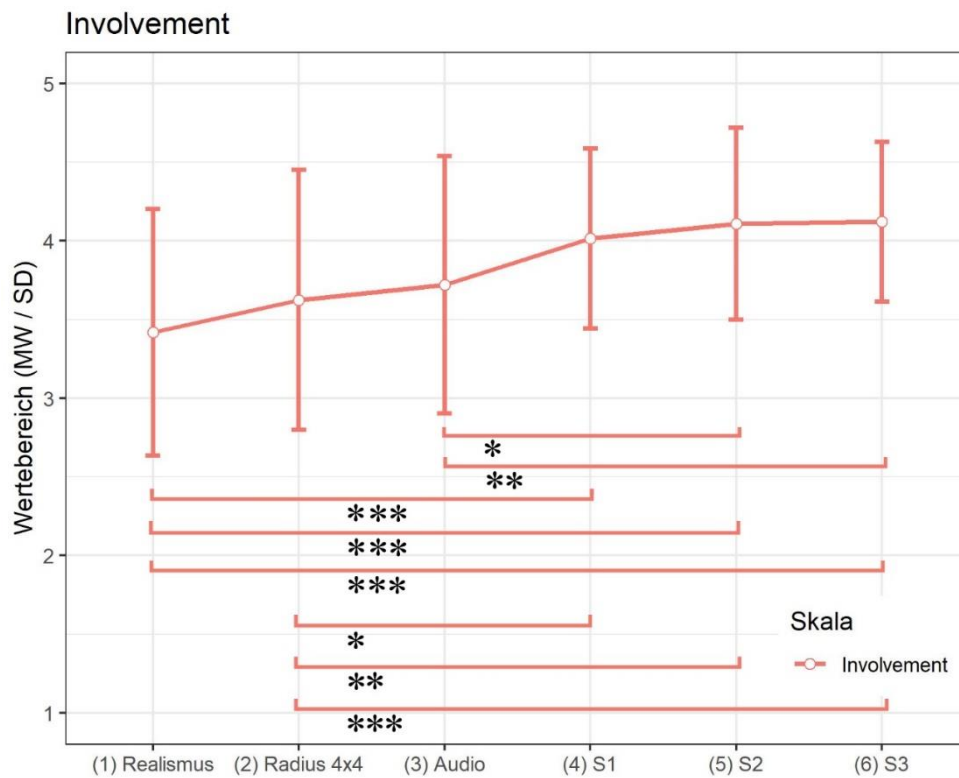


Abbildung 34: Skala Involvement des MEC SPQ.

Die Beteiligung sollte über alle Mikrozyklen hinweg durch die Erhöhung der Authentizität des Bereichs und durch die Einbindung anspruchsvoller Lernaufgaben an den Lernstationen gesteigert werden. Wie anschaulich zu sehen ist, war dies wie geplant erfolgreich. Von einem mittleren Wert in Mikrozyklus eins konnte das Involvement durch einen mittleren Effekt auf einen hohen Wert in Mikrozyklus sechs gesteigert werden ( $F(5,270) = 11.427, p < .001, \eta_G^2 = .175$ ).

Tabelle 7: Tukey-Test: Involvement.

Zyklus 1	Zyklus 2	Konfidenzintervall	p-Wert	Signifikanz
(1) Realismus	(4) S1	CI [0.25, 0.94]	$p < .001$	***
(1) Realismus	(5) S2	CI [0.35, 1.00]	$p < .001$	***
(1) Realismus	(6) S3	CI [0.36, 1.1]	$p < .001$	***
(2) Radius 4x4	(4) S1	CI [0.02, 0.76]	$p = .03$	*
(2) Radius 4x4	(5) S2	CI [0.11, 0.85]	$p = .004$	**
(2) Radius 4x4	(6) S3	CI [0.13, 0.87]	$p = .002$	***
(2) Audio	(4) S2	CI [0.05, 0.73]	$p = .014$	*
(3) Audio	(4) S3	CI [0.07, 0.74]	$p = .009$	**



## Suspension of Disbelief (MEC SPQ)

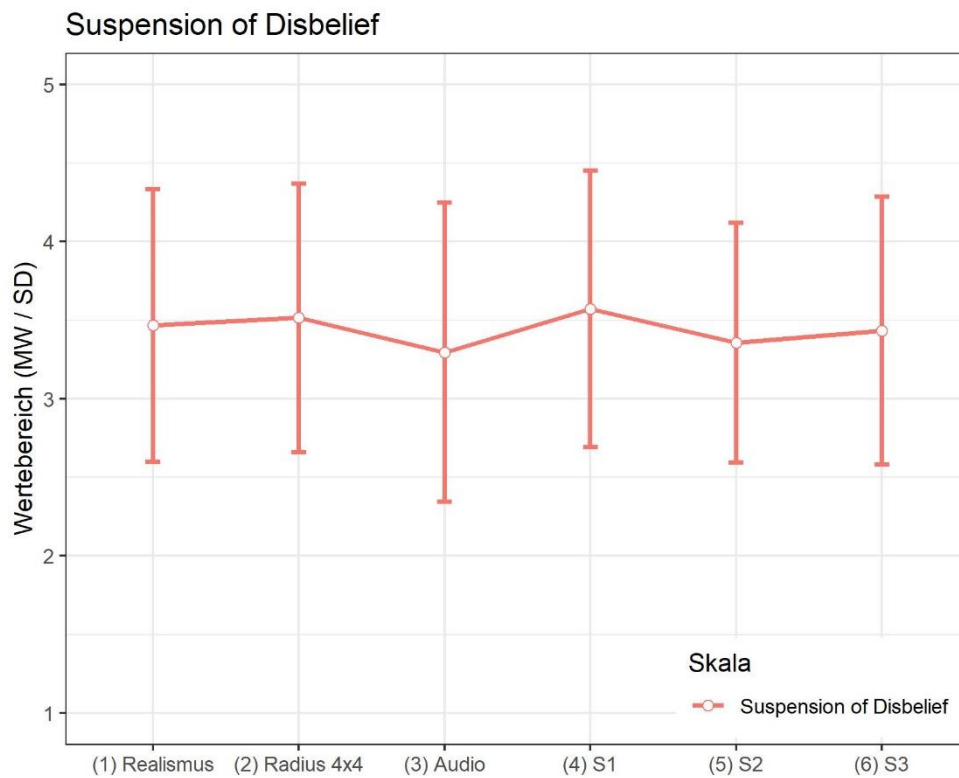


Abbildung 35: Skala Suspension of Disbelief des MEC SPQ.

Die Suspension of Disbelief zeigt zwischen den Gruppen keine signifikanten Unterschiede.

## Aufmerksamkeit (MEC SPQ)

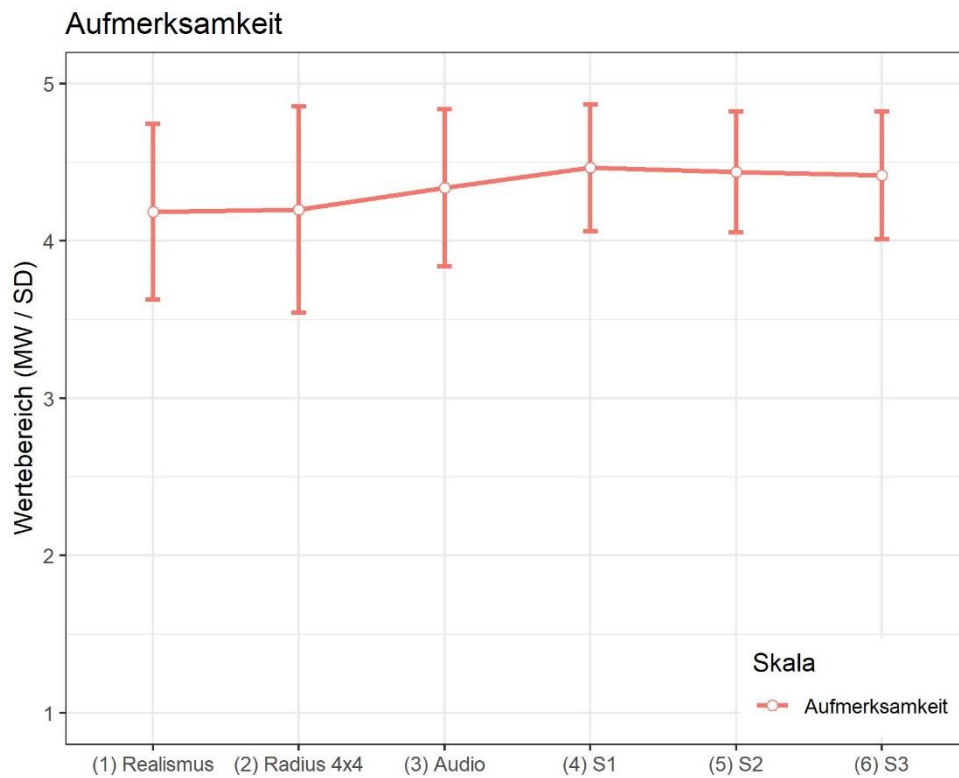


Abbildung 36: Skala Aufmerksamkeit des MEC SPQ.

Die Aufmerksamkeit wird von den Teilnehmenden schon in Mikrozyklus eins als sehr hoch angegeben. Diese steigert sich deskriptiv bis Lernstation eins (S1) und flacht dann leicht ab. Insgesamt kann ein kleiner Effekt beobachtet werden:  $F(5,270) = 2.35$ ,  $p = .04$ ,  $\eta^2 = .042$ . Der Tukey-Test (post-hoc) zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zyklen.

## Räumliches Vorstellungsvermögen (MEC SPQ)

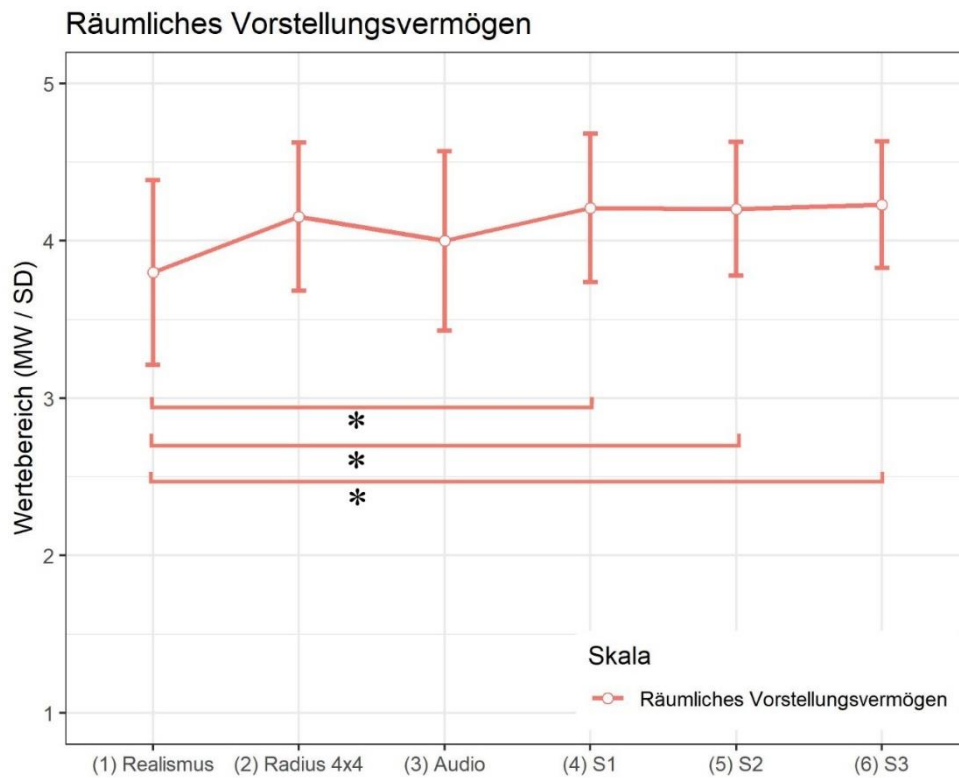


Abbildung 37: Skala Räumliches Vorstellungsvermögen des MEC SPQ.

Das räumliche Vorstellungsvermögen steigt über die Erhebungsdauer kontinuierlich an. Insgesamt steigt es mit einem kleinen Effekt:  $F(5,270) = 2.954$ ,  $p = .01$ ,  $\eta^2 = .052$ .

Die Werte des Tukey-Test (post-hoc) lauten wie folgt:

Tabelle 8: Tukey-Test: Räumliches Vorstellungsvermögen.

Zyklus 1	Zyklus 2	Konfidenzintervall	p-Wert	Signifikanz
(1) Realismus	(4) S1	CI [0.01, 0.81]	$p = .04$	*
(1) Realismus	(5) S2	CI [0.01, 0.80]	$p = .04$	*
(1) Realismus	(6) S3	CI [0.03, 0.83]	$p = .02$	*

## Domänenspezifisches Interesse (MEC SPQ)

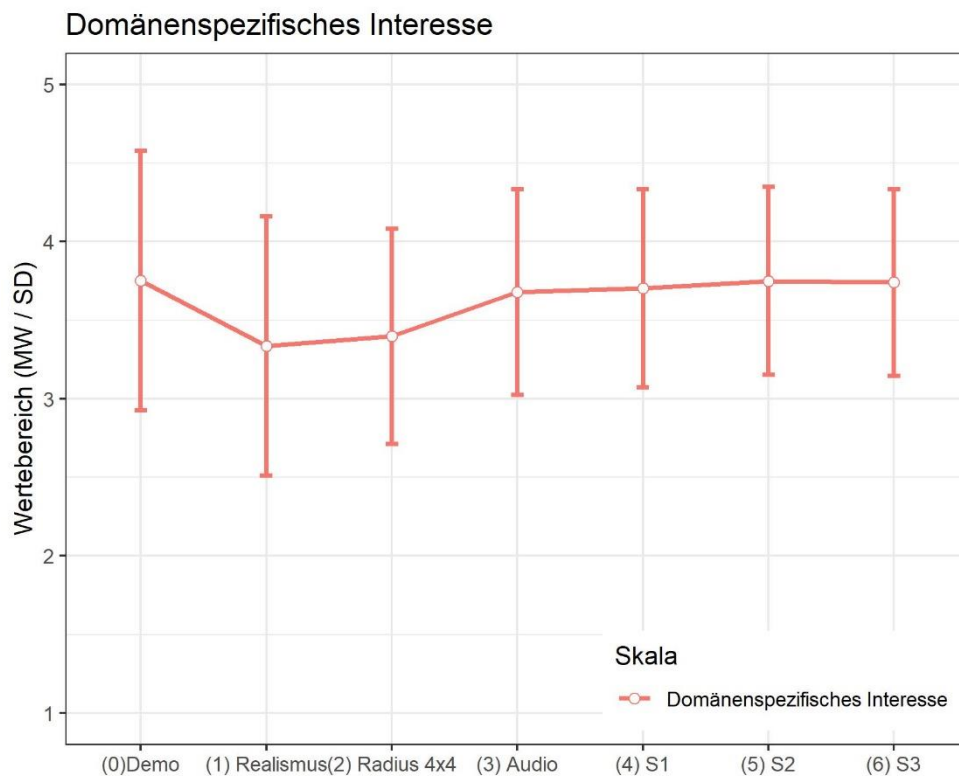


Abbildung 38: Skala Domänenspezifisches Interesse des MEC SPQ.

Ein deskriptiver Abfall mit anschließendem Anstieg und einem nicht signifikanten, kleinen Effekt ist erkennbar:  $F(6,369) = 1.528$ ,  $p = .17$ ,  $\eta_G^2 = .024$ . In dieser Subskala ist die Erhebung des Mikrozyklus null inkludiert.

Wenn der Mikrozyklus null aus der Berechnung ausgeschlossen wird, da dieser nicht Teil der Erhebung der selbstprogrammierten VR-Lernumgebung ist, ist ebenfalls ein nicht signifikanter, kleiner Effekt erkennbar:  $F(5,270) = 1.427$ ,  $p = .21$ ,  $\eta_G^2 = .052$ .

Bei beiden Berechnungen zeigt der Tukey-Test (post-hoc) keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zyklen.

## Interesse (FAM)

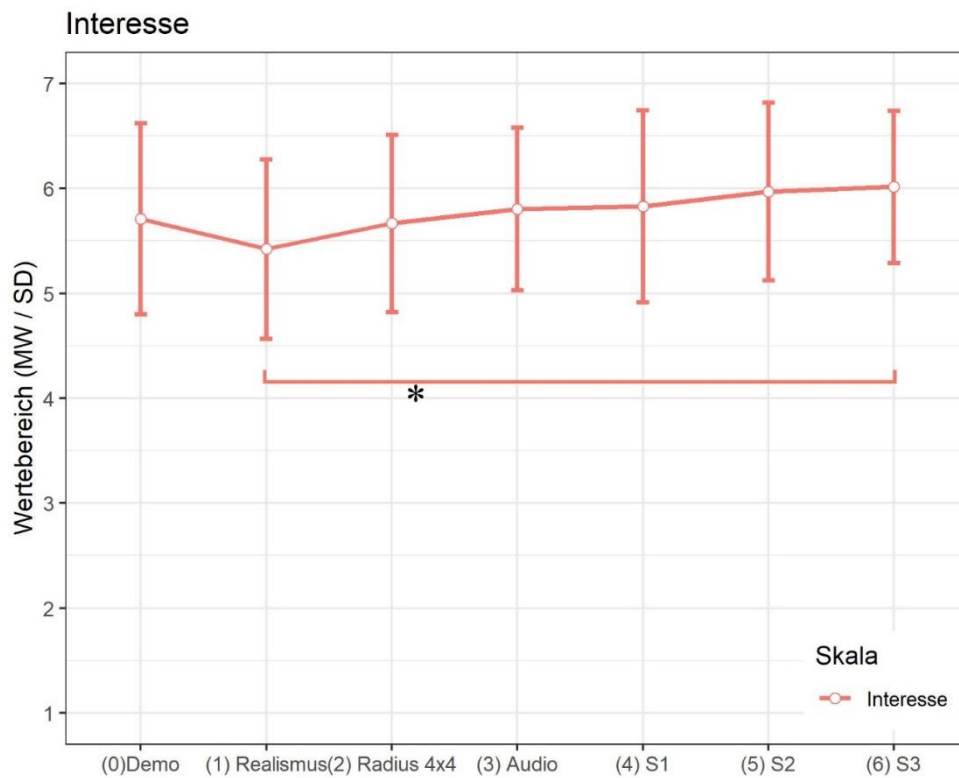


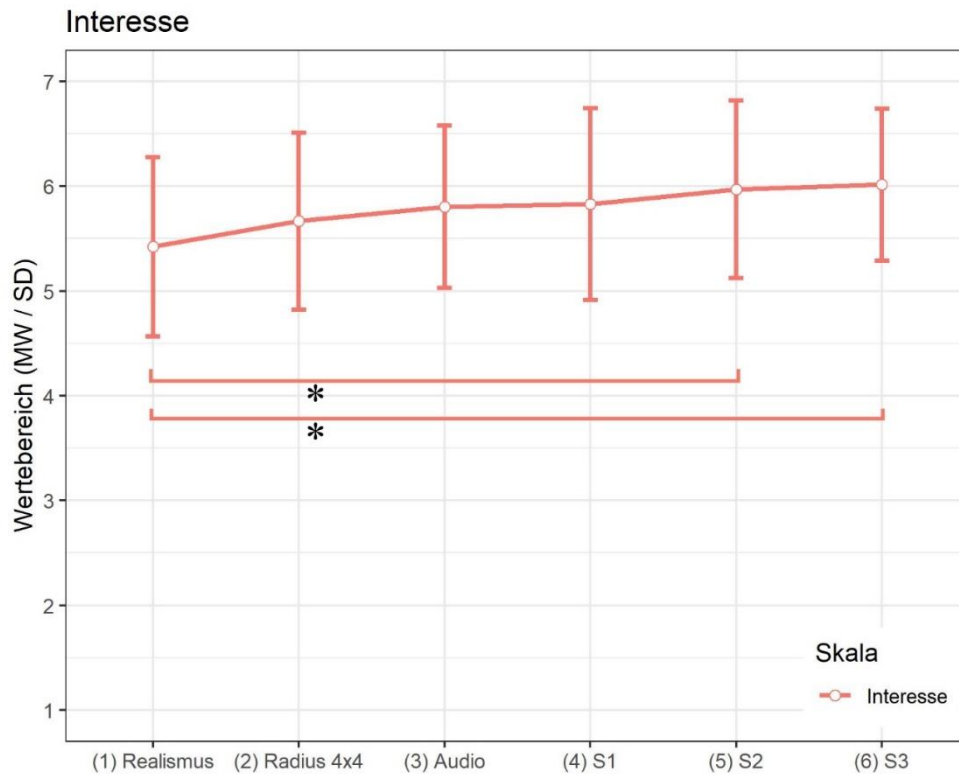
Abbildung 39: Skala Interesse des FAM. Inklusive MZ null.

Ein deskriptiver Abfall mit anschließendem, nahezu linearem Anstieg und einem nicht signifikanten, kleinen Effekt ist erkennbar:  $F(6,369) = 2.111$ ,  $p = .051$ ,  $\eta^2 = .033$ . In dieser Subskala ist die Erhebung des Mikrozyklus null inkludiert.

Die Werte des Tukey-Test (post-hoc) lauten wie folgt:

Tabelle 9: Tukey-Test: Interesse inklusive MZ null.

Zyklus 1	Zyklus 2	Konfidenzintervall	p-Wert	Signifikanz
(1) Realismus	(4) S3	CI [0.01, 1.18]	$p = .04$	*



**Abbildung 40: Skala Interesse des FAM. Exklusive MZ null.**

Wenn der Mikrozyklus 0 aus der Berechnung ausgeschlossen wird, da dieser nicht Teil der Erhebung der selbstprogrammierten VR-Lernumgebung ist, ist ein signifikanter, kleiner Effekt erkennbar:  $F(5,270) = 2.716, p = .02, \eta_G^2 = .048$ .

Die Werte des Tukey-Test (post-hoc) lauten wie folgt:

**Tabelle 10: Tukey-Test: Interesse exklusive MZ null.**

Zyklus 1	Zyklus 2	Konfidenzintervall	p-Wert	Signifikanz
(1) Realismus	(5) S2	CI [0.01, 1.09]	$p = .04$	*
(1) Realismus	(6) S3	CI [0.06, 1.13]	$p = .02$	*

## Misserfolgsbefürchtung (FAM)

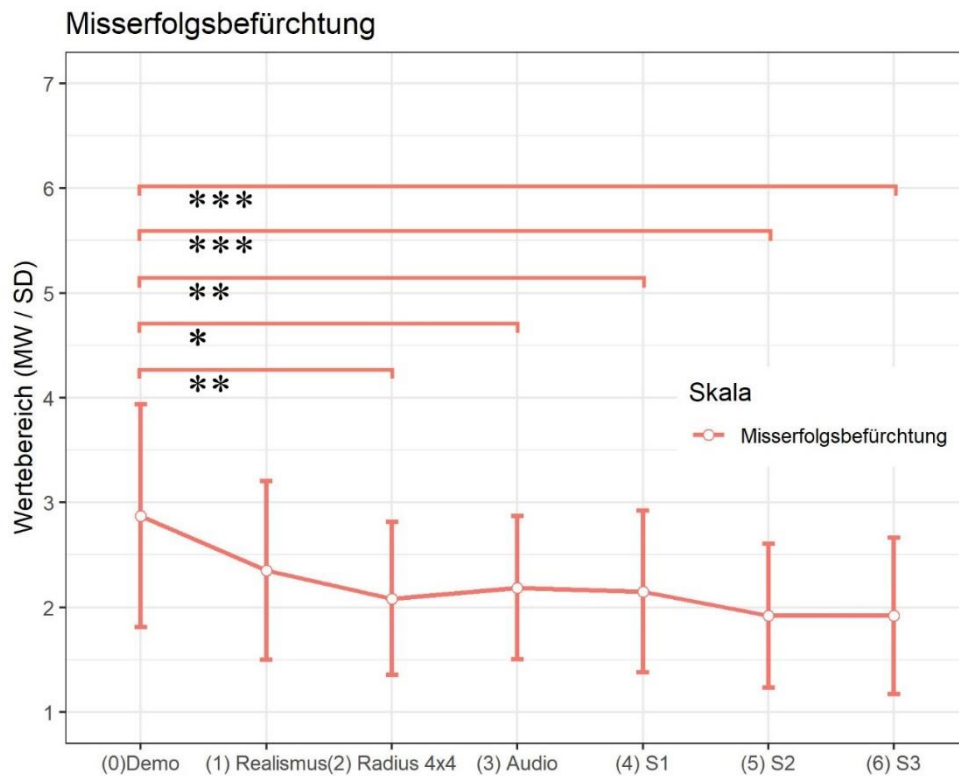


Abbildung 41: Skala Misserfolgsbefürchtung des FAM. Inklusive MZ null.

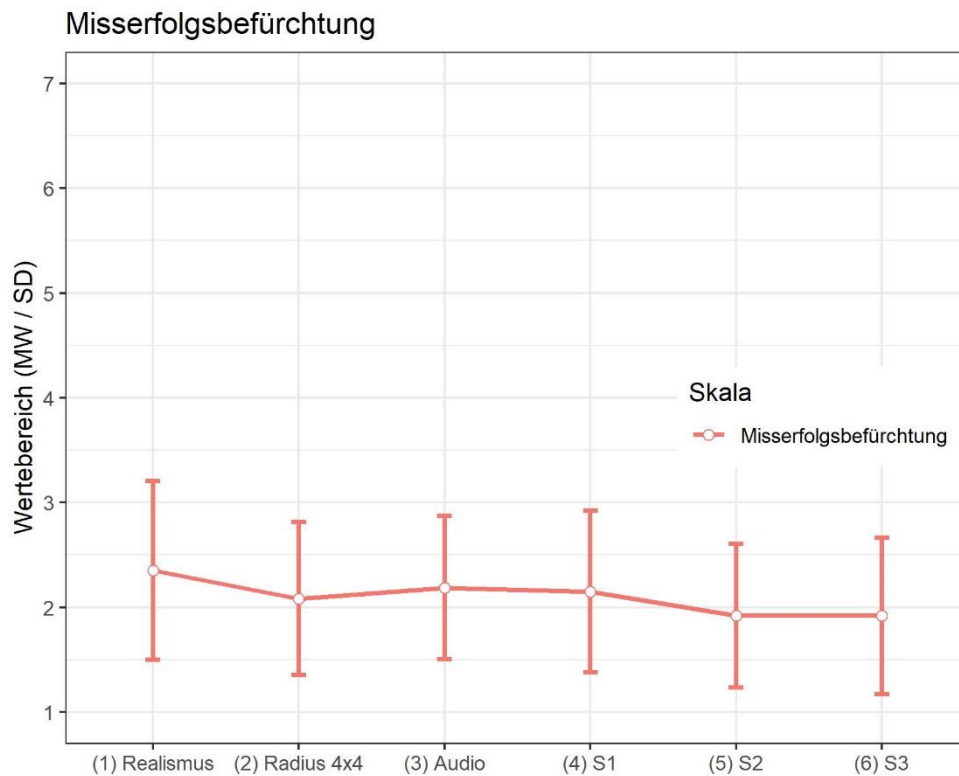
In dieser Auswertung wurde der Levene-Test signifikant ( $F(6,376) = 3.313, p = .003$ ), weshalb die Welch-ANOVA zur weiteren Analyse genutzt wurde. In dieser Subskala ist die Erhebung des Mikrozyklus null inkludiert. Insgesamt wurde ein mittlerer, signifikanter Effekt erzielt:  $F(6,376) = 5.48, p < .001, \eta_G^2 = .18$ .

Durch die Nutzung der Welch-ANOVA werden die Ergebnisse mit dem Games-Howell-Test (post-hoc) analysiert:

Tabelle 11: Games-Howell-Test: Misserfolgsbefürchtung inklusive MZ null.

Zyklus 1	Zyklus 2	Konfidenzintervall	p-Wert	Signifikanz
(0) Demo	(2) Radius 4x4	CI [-1.45, -0.17]	$p = .008$	**
(0) Demo	(3) Audio	CI [-1.34, -0.04]	$p = .03$	*
(0) Demo	(4) S1	CI [-1.34, -0.11]	$p = .01$	**
(0) Demo	(5) S2	CI [-1.54, -0.37]	$p < .001$	***
(0) Demo	(6) S3	CI [-1.53, -0.39]	$p < .001$	***

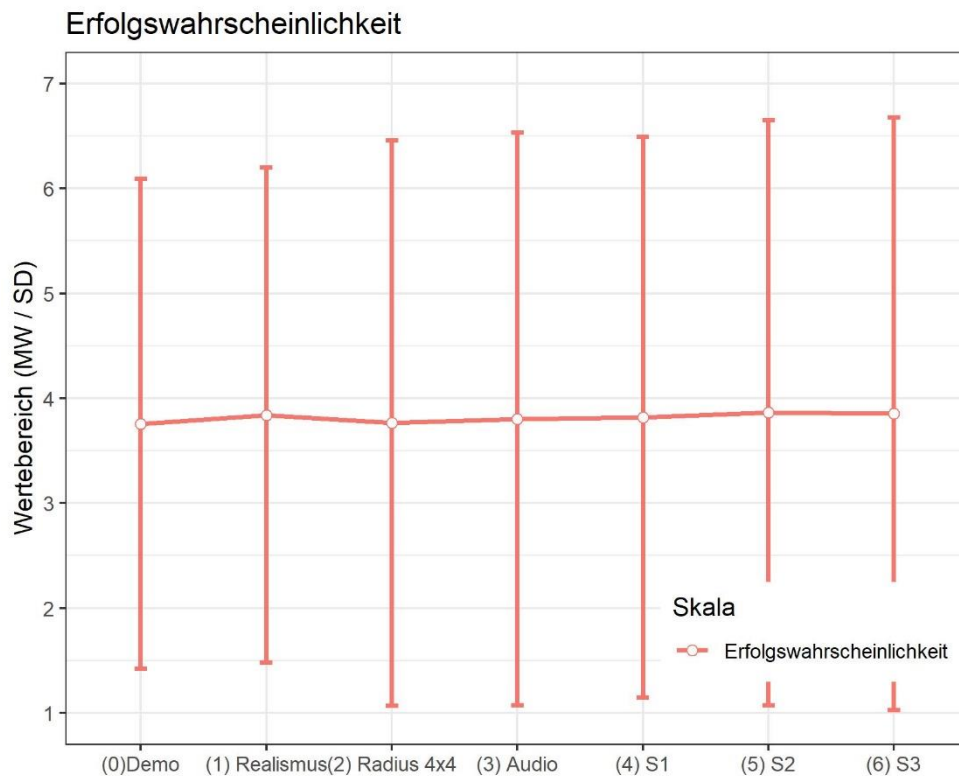




**Abbildung 42: Skala Misserfolgsbefürchtung des FAM. Exklusive MZ null.**

Wenn der Mikrozyklus null aus der Berechnung ausgeschlossen wird, da dieser nicht Teil der Erhebung der selbstprogrammierten VR-Lernumgebung ist, ist ein nicht signifikanter, kleiner Effekt erkennbar:  $F(5,270) = 1.199$ ,  $p = .03$ ,  $\eta_G^2 = .02$  und der Levene-Test ist nicht signifikant. Der Tukey-Test (post-hoc) zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zyklen.

## Erfolgswahrscheinlichkeit (FAM)



**Abbildung 43: Skala Erfolgswahrscheinlichkeit des FAM. Inklusive MZ null.**

Die Erfolgswahrscheinlichkeit wird nur mit geringsten Abweichungen des Mittelwerts (MW) die gesamte Erhebung im mittleren Bereich verortet. Weder in der Analyse mit der inkludierten Demo noch ohne wird ein signifikanter bzw. nicht signifikanter Effekt festgestellt. Der Tukey-Test (post-hoc) zeigt dementsprechend auch keine Signifikanzen zwischen den Zyklen. Hervorzuheben sind die hohen Standardabweichungen.

## Herausforderung (FAM)

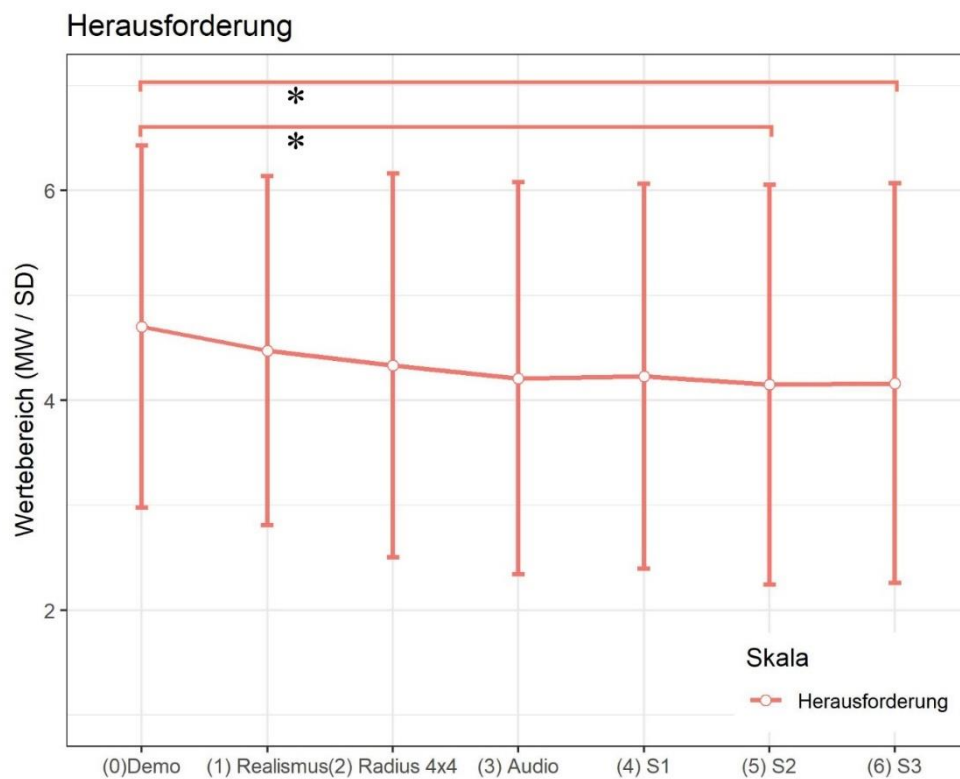


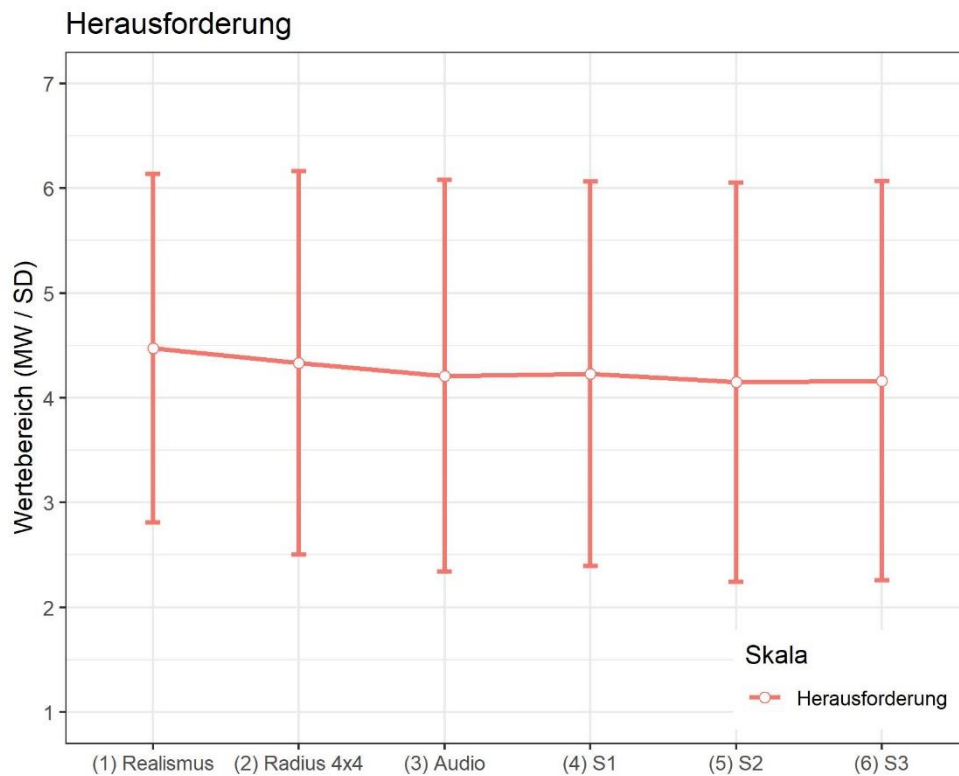
Abbildung 44: Skala Herausforderung des FAM. Inklusive MZ null.

Ein deskriptiver Abfall mit einem signifikanten, kleinen Effekt ist erkennbar:  $F(6,369) = 3.048$ ,  $p = .006$ ,  $\eta^2 = .047$ . In dieser Subskala ist die Erhebung des Mikrozyklus null inkludiert.

Die Werte des Tukey-Test (post-hoc) lauten wie folgt:

Tabelle 12: Tukey-Test: Herausforderung inklusive MZ null.

Zyklus 1	Zyklus 2	Konfidenzintervall	p-Wert	Signifikanz
(0) Demo	(5) S2	CI [-1.07, -0.04]	$p = .03$	*
(0) Demo	(6) S3	CI [-1.05, -0.02]	$p = .04$	*



**Abbildung 45: Skala Herausforderung des FAM. Exklusive MZ null.**

Wenn der Mikrozyklus null aus der Berechnung ausgeschlossen wird, da dieser nicht Teil der Erhebung der selbstprogrammierten VR-Lernumgebung ist, ist nur eine deskriptive Abnahme und kein Effekt erkennbar. Der Tukey-Test (post-hoc) zeigt dementsprechend keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zyklen.

## Realismus

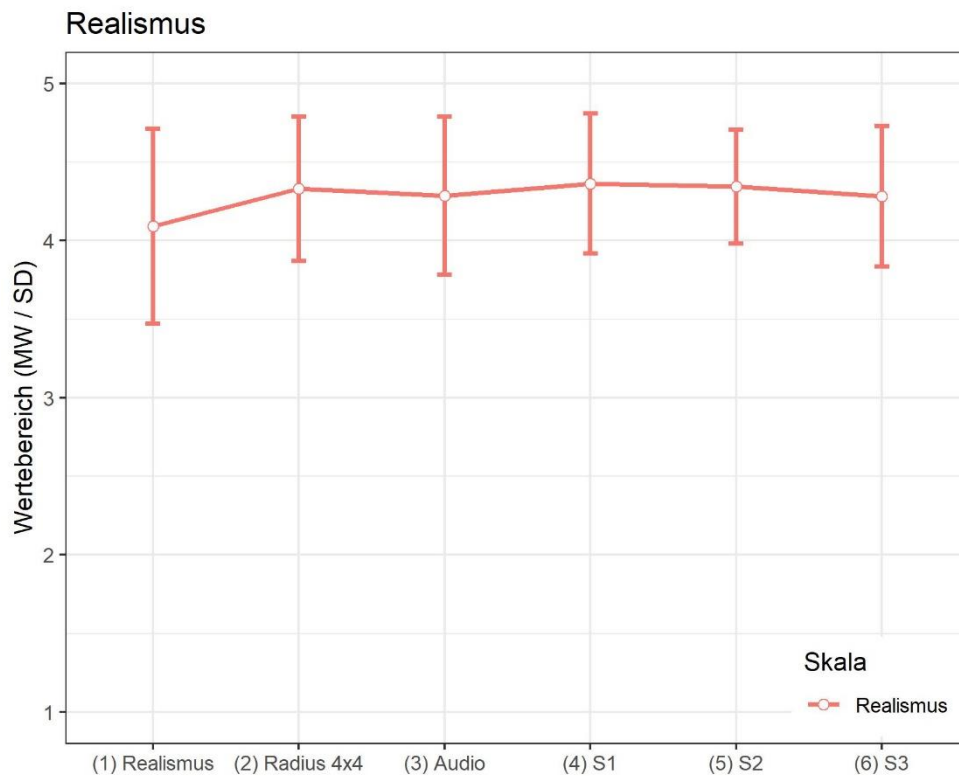


Abbildung 46: Skala Realismus. Mikrozyklus eins bis sechs.

Der Realismus wurde in den Mikrozyklen eins und zwei gezielt berücksichtigt. Die Basisumgebung in Zyklus eins weist bereits einen ausreichend hohen Wert auf, um mit dem Realismus-Niveau fortzufahren. Es gab jedoch qualitatives Feedback von Teilnehmenden, dass viele Aspekte trotz des insgesamt hohen Wertes als unzureichend angesehen wurden. Dies wurde bei der Überarbeitung des Mikrozyklus zwei korrigiert. Insgesamt war ein kleiner, nicht signifikanter Effekt zu verzeichnen ( $F(5,270) = 1.645, p = .148, \eta^2 = .03$ ).

## Wahrgenommene Bedienbarkeit

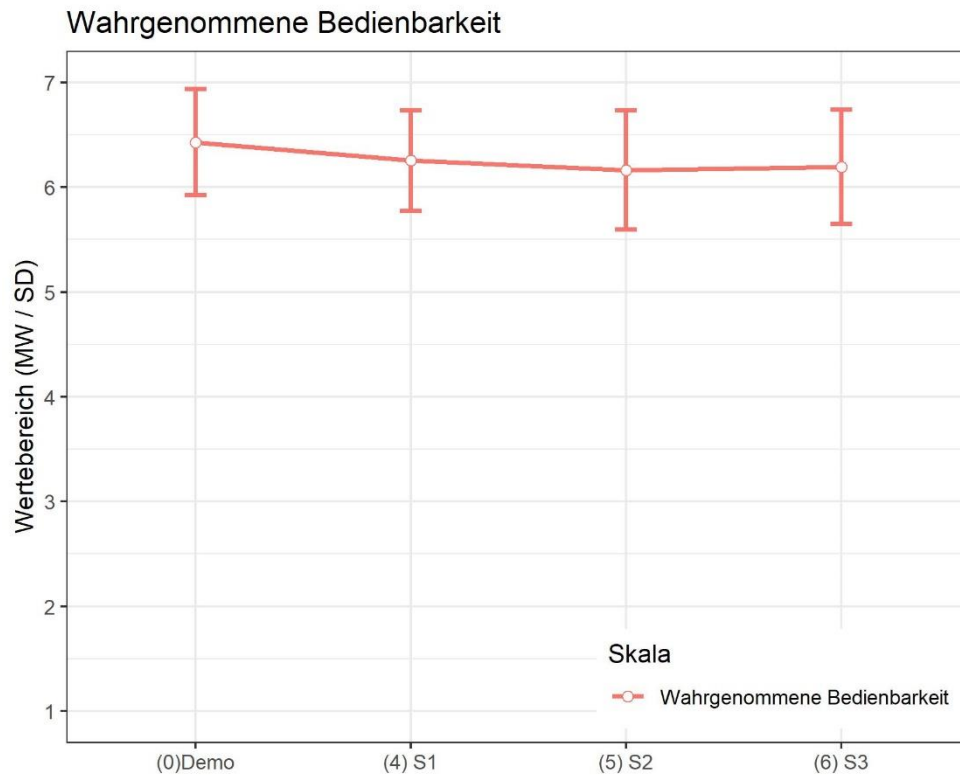


Abbildung 47: Skala Wahrgenommene Bedienbarkeit. Mikrozyklus null und vier bis sechs.

Die wahrgenommene Bedienbarkeit wird nur mit geringen Abweichungen des MW im höchsten Bereich der Skala verortet. Weder in der Analyse mit der inkludierten Demo noch ohne wird ein signifikanter bzw. nicht signifikanter Effekt festgestellt. Der Tukey-Test (post-hoc) zeigt dementsprechend auch keine Signifikanzen zwischen den Zyklen.

## Wahrgenommene Lerneffektivität

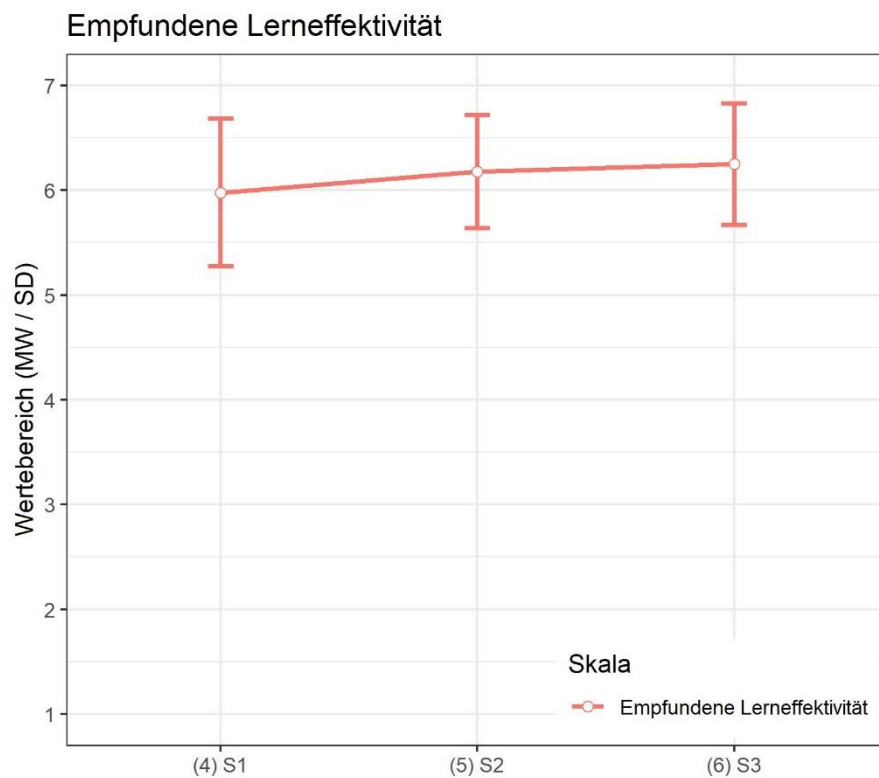


Abbildung 48: Skala Wahrgenommene Lerneffektivität. Mikrozyklus vier bis sechs.

Der MW der wahrgenommenen Lerneffektivität wird mit einem kleinen deskriptiven Anstieg im höchsten Bereich der Skala verortet. Insgesamt war ein kleiner, nicht signifikanter Effekt zu verzeichnen ( $F(2,144) = 1.629$ ,  $p = .2$ ,  $\eta^2 = .022$ ). Der Tukey-Test (post-hoc) zeigt keine Signifikanzen zwischen den Zyklen.



## VR-Skala

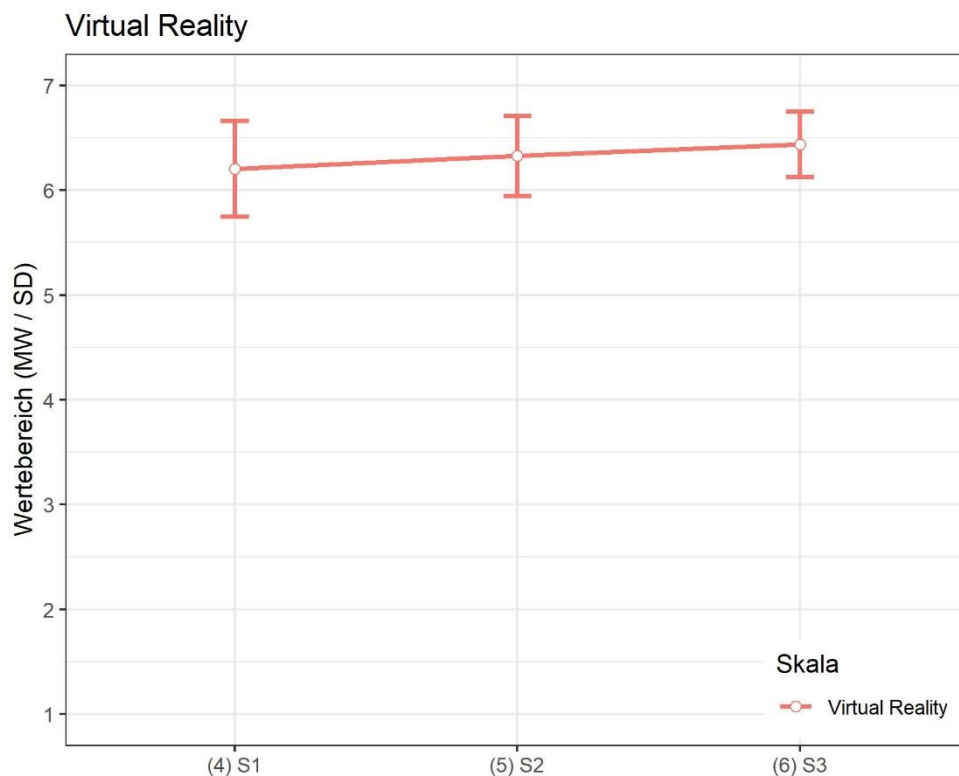


Abbildung 49: VR-Skala. Mikrozyklus vier bis sechs.

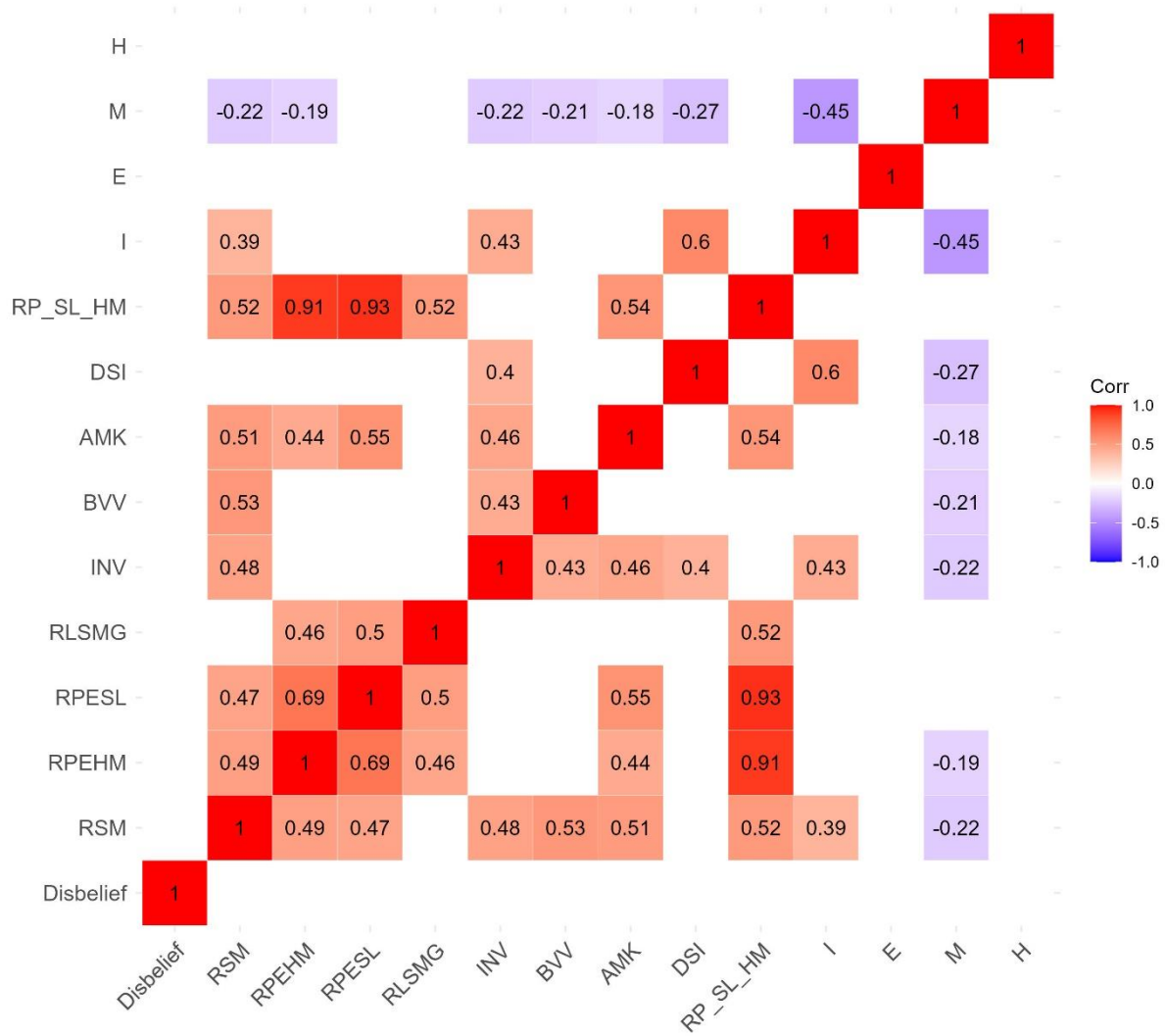
Die VR-Skala ist mit einer geringen, deskriptiven Steigung des MW im höchsten Bereich der Skala verortet. In der Analyse wird kein signifikanter bzw. nicht signifikanter Effekt festgestellt. Der Tukey-Test (post-hoc) zeigt dementsprechend auch keine Signifikanzen zwischen den Zyklen.

## 5.2 Korrelationen

Die Korrelationsmatrizen aller erhobenen Komponenten der jeweiligen Mikrozyklen werden nachfolgend gelistet:

1. Korrelationen aller Skalen der Mikrozyklen eins bis sechs: nur die programmierte VR-Lernumgebung ohne Mikrozyklus null.
2. Korrelationen aller Werte des FAM + domänenspezifisches Interesse von Mikrozyklus null bis sechs.
3. Korrelationen der Mikrozyklen vier bis sechs (Stationen eins bis drei) mit Fokus auf den Skalen Wahrgenommene Lerneffektivität, VR-Skala und Wahrgenommene Bedienbarkeit.

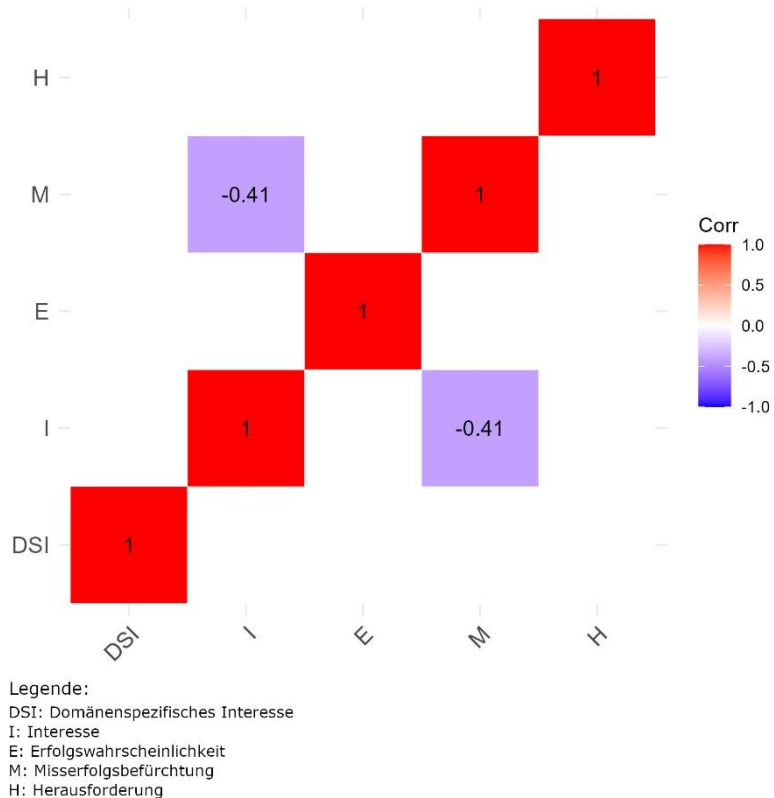
In jeder Abbildung sind nur die Korrelationen dargestellt, die einen signifikanten  $p$ -Wert besitzen. Innerhalb des Feldes wird der  $r$ -Wert dargestellt. Je rötlicher die Färbung des Feldes, desto höher der  $r$ -Wert und damit die positive Korrelation. Je blauer das Feld, desto niedriger der  $r$ -Wert und damit die negative Korrelation.



Legende:  
 Disbelief: Suspension of Disbelief  
 RSM : Räumliches Situationsmodell  
 RPEHM: Handlungsmöglichkeiten  
 RPESL: Selbstlokation  
 RLSMG: Realismus  
 INV: Involvement  
 BVV: Räumlich-Visuelles Vorstellungsvermögen  
 DSI: Domänenspezifisches Interesse  
 RP\_SL\_HM: Räumliches Präsenzerleben  
 I: Interesse  
 E: Erfolgswahrscheinlichkeit  
 M: Misserfolgsbefürchtung  
 H: Herausforderung

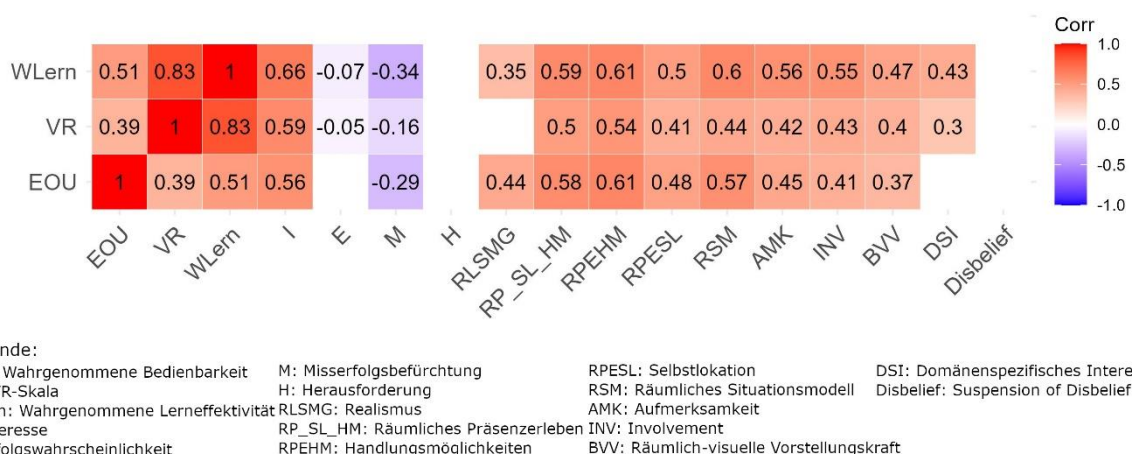
**Abbildung 50: Korrelationsmatrix der eingesetzten Skalen des FAM, Realismus und MEC SPQ über die Erhebungszeitpunkte Mikrozyklus eins bis sechs.**

In Abbildung 50 werden nur die Subskalen des FAM, des MEC SPQ und die Realismus-Skala auf Korrelation zwischen den Messzeitpunkten MZ eins bis MZ sechs untersucht, da diese hier einheitlich eingesetzt wurden. Die VR-Skala, die Skala Wahrgenommene Bedienbarkeit sowie die Skala Wahrgenommene Lerneffektivität wurden hier exkludiert, da diese nur in MZ vier – sechs erhoben wurden.



**Abbildung 51: Korrelationsmatrix der Skalen, die auch in Mikrozyklus 0 eingesetzt wurden, über die Erhebungszeitpunkte Mikrozyklus null bis sechs.**

In Abbildung 51 wurden die Subskalen des FAM sowie die Subskala Domänenspezifisches Interesse des MEC SPQ über die Messzeitpunkte MZ null bis MZ sechs auf Korrelationen untersucht. Diese Berechnung wurde zusätzlich durchgeführt, um zu prüfen, ob sich durch die Hinzunahme des MZ null die Korrelation der Werte im Gegensatz zu denen aus Abbildung 50 verändert. Es ist zu sehen, dass die negative Korrelation der Misserfolgsbefürchtung mit dem Interesse leicht um .04 Punkte sinkt.

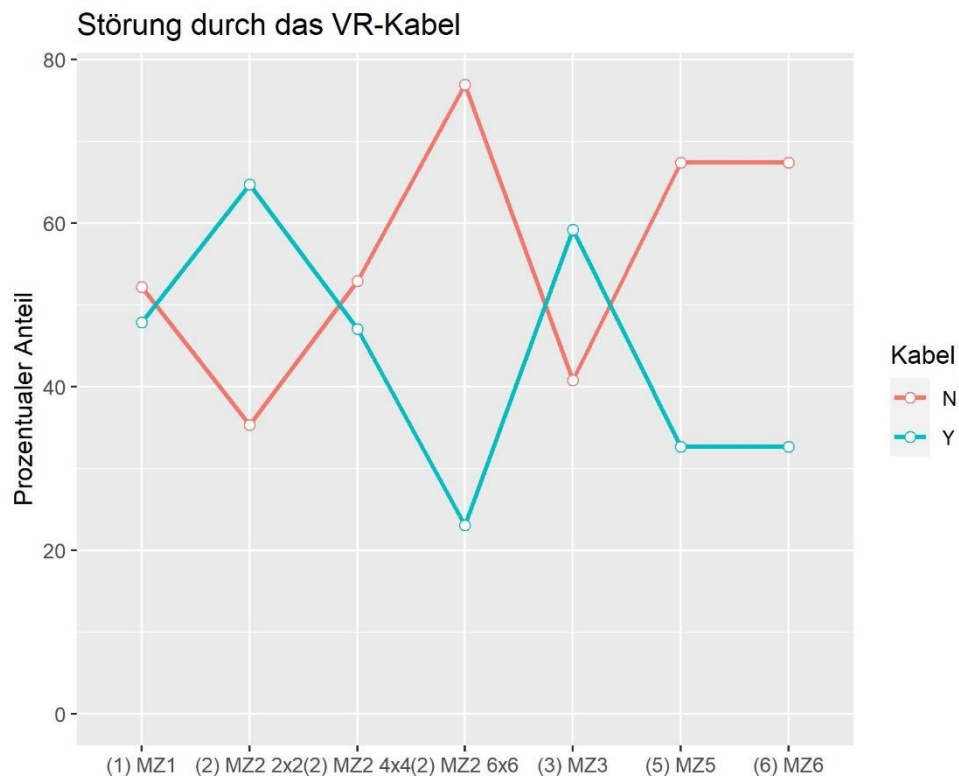


**Abbildung 52: Korrelationsmatrix der Skalen Wahrgenommene Bedienbarkeit, VR-Skala und Wahrgenommene Lerneffektivität mit den eingesetzten Skalen des FAM, Realismus und des MEC SPQ in den Mikrozyklen vier bis sechs.**

In Abbildung 52 wurden die Korrelationen der VR-Skala, der Skala Wahrgenommene Bedienbarkeit sowie der Skala Wahrgenommene Lerneffektivität mit den Subskalen des FAM, des MEC SPQ und dem Realismus in den Messzeitpunkten MZ vier bis MZ sechs errechnet.

## Kabeleinsatz

Über den Verlauf der Erhebung wurde in jedem Mikrozyklus erhoben, ob sich die Teilnehmenden am Kabel stören, das Laptop und VR-Brille verbunden hat.



**Abbildung 53: Prozentuale Verteilung der wahrgenommenen Störung des Kabels der VR-Brille mit Ja (Y) und Nein (N).**

Die Abbildung 53 zeigt den prozentualen Anteil der Teilnehmenden zu jedem Erhebungszeitpunkt, ob das Kabel gestört hat (Y) oder nicht (N). Zu Mikrozyklus vier liegen keine Daten vor, da hier eine problematische Einstellung mit der Frage vorlag. Es ist zu sehen, dass Mikrozyklus eins nahezu ausgeglichen ist mit 52.17 % Nein und 47.82 % Ja. Die Ergebnisse von Mikrozyklus zwei wurden nach den Bewegungsradien aufgeteilt. Hier zeigt sich, dass im Radius 2x2 Meter eine erhöhte Störung von 64.71 % vorlag. Im Radius 4x4 Meter sank dies auf 47.06 % ab. Im Radius 6x6 Meter sank diese weiter auf 23.08 % ab. In Mikrozyklus drei steigt die Störung auf 59.18 % an und sinkt in den Lernstationen zwei und drei (MZ fünf & sechs) auf jeweils 32.65 % ab.

### 5.3 Pfadanalysen Mikrozyklus 1 – 6

Es werden nun die Erhebungsumstände der Mikrozyklen in Kürze erläutert sowie Ergebnisse präsentiert. In Mikrozyklus eins bis sechs werden Pfadanalysen errechnet, um die Zusammenhänge der Variablen genauer zu untersuchen. Es wird nach der Ergebnisdarstellung eine kurze Analyse und Diskussion angeführt, die während des Erhebungsprozesses stattgefunden hat und welche Auswirkungen die Ergebnisse auf den Designprozess und die Konzeption des darauffolgenden Zyklus haben. Hierfür wurden zusätzlich zu den Pfadanalysen die jeweils vorliegenden Werte der Subskalen hinzugezogen (siehe Kapitel 5.1). Die Diskussion der kumulierten Ergebnisse findet ausführlich in Kapitel sechs statt. In Mikrozyklus null wird keine Pfadanalyse errechnet, da das Präsenzerleben nicht erhoben wurde. Hier werden aus Gründen der

Vollständigkeit die Ergebnisse der erhobenen Skalen FAM, Wahrgenommene Bedienbarkeit, domänenspezifisches Interesse, sowie die Implikationen, die sich daraus für die restliche Erhebung ergaben, berichtet. Die qualitativen Daten der Zyklen werden ohne nachträgliche Rechtschreib- und Grammatikkorrektur berichtet.

### Mikrozyklus 0: Neuigkeitseffekt

Um die Teilnehmenden ( $N = 100$ ) an die Nutzung von VR zu gewöhnen und den Neuigkeitseffekt abzumildern, wurde die Einführungsdemo der Oculus Quest genutzt. Die Teilnehmenden durchliefen einzeln die interaktive Simulation, um die Steuerung der VR-Brille und den Umgang mit den Controllern zu erlernen. Erhoben wurde hier die aktuelle Motivation (FAM), die wahrgenommene Bedienbarkeit und die Subskala domänenspezifisches Interesse des räumlichen Präsenzerlebens, um die Ausgangsbedingungen der Teilnehmenden festzuhalten. Auf die Erhebung des räumlichen Präsenzerlebens wurde verzichtet, da das Einführungsprogramm der Oculus nichts mit der geplanten VR-Lernumgebung gemein hat und die vorherrschende virtuelle Umgebung abstrakt gestaltet wurde.

### Soziodemografische Daten

Die Geburtsjahre des Demo-Zyklus bestehen aus 18 % aus 2004, 51 % aus 2005 und 31 % aus 2006. Das Geschlecht der Teilnehmenden verteilt sich auf 49 % weiblich und 51 % männlich.

### Ergebnisse

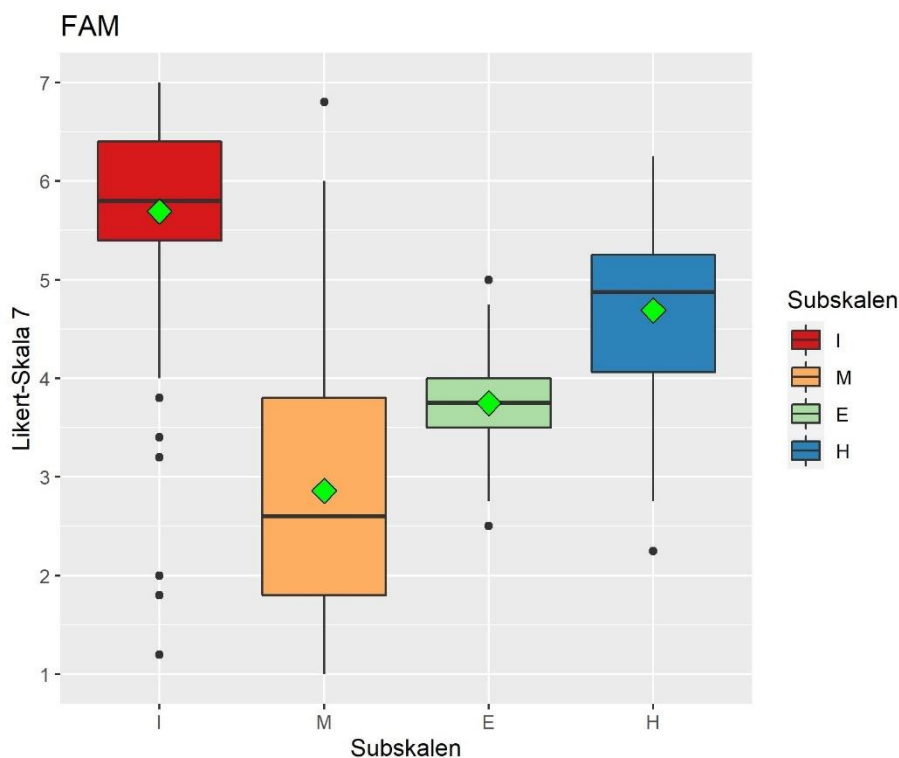


Abbildung 54: Boxplot Diagramm der Subskalen Interesse (I), Misserfolgsbefürchtung (M), Erfolgswahrscheinlichkeit (E) und Herausforderung (H) des FAM. Der Mittelwert ist grün eingezeichnet.

In den Ergebnissen des FAM (Abbildung 54) kann gezeigt werden, dass generell ein hohes Interesse an der Nutzung von VR ( $MW = 5.7, SD = 1.12$ ) besteht. Die Misserfolgsbefürchtung hingegen ist im Durchschnitt ( $MW = 2.86, SD = 1.38$ ) eher gering ausgeprägt. Die Erfolgswahrscheinlichkeit wird von den Teilnehmenden einheitlich im mittleren Feld der Skala ( $MW = 3.78, SD = .47$ ) angegeben. Die Herausforderung ist etwas erhöht ( $MW = 4.69, SD = .9$ ).

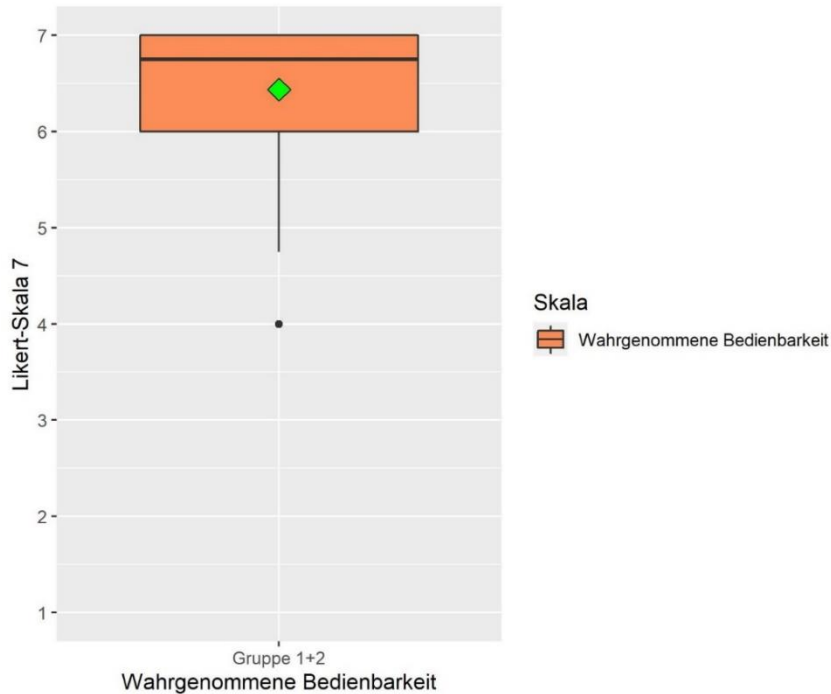


Abbildung 55: Ergebnisse der Skala Wahrgenommene Bedienbarkeit.

Die wahrgenommene Bedienbarkeit erreichte mehrheitlich Höchstwerte ( $MW = 6.44, SD = .66$ ).

Die Subskala Domänenspezifisches Interesse des räumlichen Präsenzerlebens ist durchschnittlich in der oberen Skalenhälfte angesiedelt mit  $MW = 3.75$  und  $SD = .86$ .

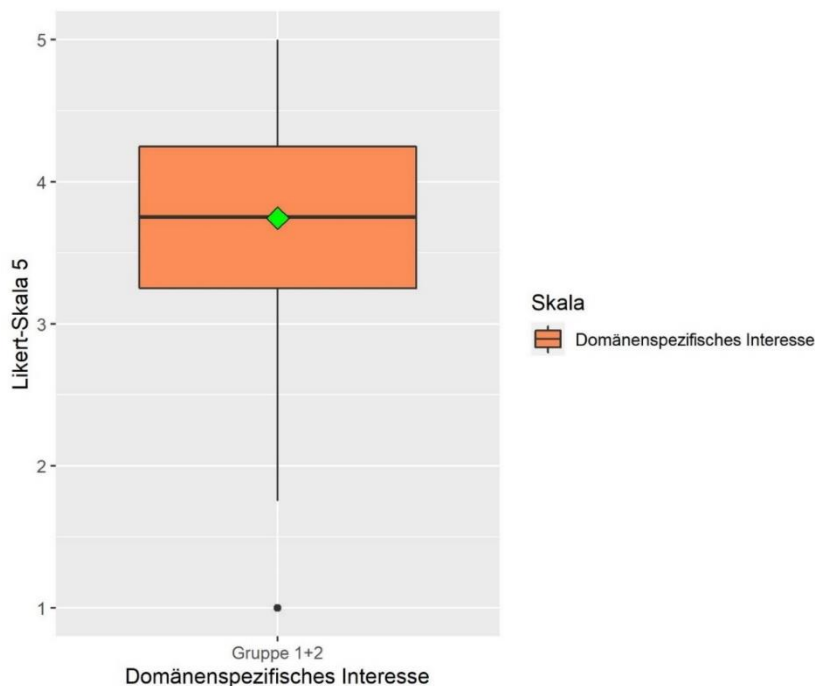


Abbildung 56: Ergebnisse der Subskala Domänenspezifisches Interesse.

## **Diskussion und Analyse**

Das erhöhte Interesse kann auf die Neuheit des Mediums VR und den damit verbundenen Neuigkeitseffekt zurückgeführt werden. Weitere Einflussmöglichkeiten können allerdings auch das Fernbleiben aus dem Regelunterricht oder die Erprobung neuer Unterrichtsmethoden sein. Die geringe Misserfolgsbefürchtung deutet darauf hin, dass die Teilnehmenden eine gewisse Selbstsicherheit im Umgang mit der VR besitzen und davon ausgehen, dass sie die gestellten Aufgaben erfüllen können. Im Kontrast hierzu steht allerdings die nur mittelmäßig eingeschätzte Erfolgswahrscheinlichkeit. Es wäre anzunehmen gewesen, dass eine geringe Misserfolgsbefürchtung zu einer hohen Erfolgswahrscheinlichkeit führt. Die Teilnehmenden sehen zwar anscheinend die Möglichkeit für ein Scheitern als sehr gering, aber die Chance auf Erfolg dennoch eher skeptisch. Dies deutet auf eine Unsicherheit der inhaltlichen Bearbeitung hin. Die Herausforderung wurde als überdurchschnittlich hoch angegeben, was den niedrigen Wert der Erfolgswahrscheinlichkeit erklären kann, da die Aufgabe nicht als einfach angesehen wird. Dies kann aus der Formulierung der Aufgabenstellung resultieren, da nicht klar ersichtlich ist, was die genaue Aufgabe in der VR-Umgebung sein wird. Das domänenspezifische Interesse ist allgemein recht hoch, was den hohen Interesse-Wert des FAM unterstützt und zeigt, dass die Teilnehmenden sich möglicherweise auch schon vor dieser Studie für VR interessiert haben.

Insgesamt lässt sich ableiten, dass der Umgang mit den Controllern und die Erledigung von Aufgaben in der VR generell kein Problem für die Teilnehmenden darstellt und die Bedienung als sehr leicht empfunden wird. Dies sind gute Voraussetzungen, um einen Prototyp mit geplanten Interaktionen und Lernaufgaben zu evaluieren. Für Mikrozyklus eins gab es keine Hürden und er konnte wie geplant stattfinden.

### **Mikrozyklus 1: Realismus**

Nach der Einführung der VR und ihrer Funktionsweise wird mit den Teilnehmenden ( $n = 46$ ) die konzipierte VR-Umgebung evaluiert. Zunächst wird der Realismus und die realistische Darstellung der Umgebung untersucht. Die Evaluation der Realitätsnähe/des Realismus ist wichtig, da sich die Wahrnehmung der Realität subjektiv unterscheidet und die Wahrnehmung der komplexen Facetten der Natur in einer nachgebauten virtuellen Welt für alle Teilnehmenden möglichst einheitlich sein sollte, damit eine Einstufung als realitätsnah beziehungsweise real möglich sein kann. Es wird angenommen, dass das räumliche Situationsmodell als auch die Suspension of Disbelief hierbei die wichtigsten Einflussfaktoren darstellen (siehe Kapitel 2.1). Der virtuelle Raum muss so gestaltet sein, dass die Proportionen, Distanzen, Lichtverhältnisse, 3-D-Modelle und deren Bewegungen realitätsnah sind. Dies sorgt dafür, dass der Raum mental erfasst und als neue Realität angenommen werden kann. Als Kontrollfaktor kann hierfür die Suspension of Disbelief dienen. Ist die Darstellung nicht überzeugend genug beziehungsweise weicht zu sehr von der Wahrnehmung der Realität ab, müssten die Teilnehmenden dies willentlich unterdrücken, um die virtuelle Umgebung als neuen egozentrischen Referenzrahmen anzunehmen. Um ein hohes räumliches Präsenzerleben erzeugen zu können, wird angenommen, dass qualitativ hochwertige 3-D-Assets, die richtigen Lichtverhältnisse und Reflexionen der Asset-Materialien sowie realitätsnahe Animationen der Natur notwendig sind.



## Soziodemographische Daten

Die Geburtsjahre des ersten Zyklus bestehen aus 30,43 % aus 2004, 67,39 % aus 2005 und 2,17 % aus 2006. Das Geschlecht der Teilnehmenden verteilt sich auf 58,7 % weiblich und 41,3 % männlich.

## Ergebnisse der Pfadanalyse

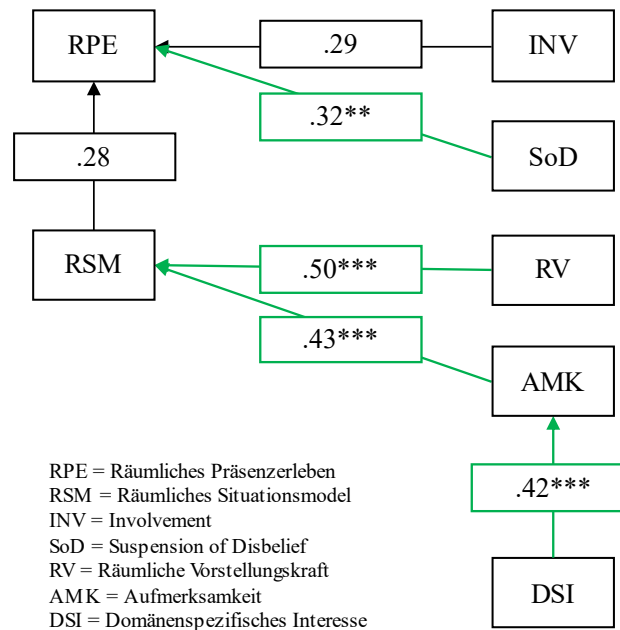


Abbildung 57: Pfadanalyse des Mikrozyklus 1.

Die Pfadanalyse des räumlichen Präsenzerlebens zeigt, dass das räumliche Situationsmodell keinen Einfluss auf die Präsenzerfahrung hatte. Es scheint, dass die Version des Modells von den Probanden nicht vollständig mental erfasst wurde. Es zeigt sich, dass die Suspension of Disbelief, einen Einfluss auf das räumliche Präsenzerlebnis ausübte ( $\beta = .32$ , CI [0.11, 0.52],  $p = .007$ ), was bedeutet, dass die Umgebung nicht hochwertig genug war und ein aktives Ausblenden störender Reize erforderte. Auf das räumliche Situationsmodell hatten sowohl die visuelle Raumvorstellung ( $\beta = .43$ , CI [0.24, 0.62],  $p < .001$ ) als auch die Aufmerksamkeit ( $\beta = .5$ , CI [0.29, 0.70],  $p < .001$ ) einen Einfluss. Dies lässt sich u.a. dadurch erklären, dass viele der Probanden zum zweiten Mal eine VR-Brille trugen und daher besonders aufmerksam auf die Umgebung achteten. Die räumliche Vorstellungskraft hat eine unterstützende Wirkung bei der Aneignung des Raumes. Das domänenspezifische Interesse ( $\beta = .42$ , CI [0.20, 0.64],  $p = .002$ ) spielte eine unterstützende Rolle auf die Aufmerksamkeit der Probanden.

Tabelle 13: Modellfit-Werte MZ eins. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten.

TLI	CFI	RMSEA	SRMR	Chi-Quadrat
(>.9)	(>.95)	(<.08)	(<.08)	(>.05)
.84	.904	.11	.093	$p = .123$

Die Modellfit-Werte liegen nur leicht außerhalb der gewünschten Wertebereiche. Die Zusammenhänge innerhalb der Daten werden gut vom Modell wiedergegeben.

## Qualitative Daten

Die Teilnehmenden hatten die Möglichkeit in jedem Mikrozyklus mit einer Freitext-Frage anzugeben, ob sie etwas in der VR gestört hat. Die Rückmeldungen sind nach ihrem inhaltlichen Bezug sortiert.

Tabelle 14: Qualitatives Feedback MZ eins.

<b>Sehstörung:</b>
Konnte nicht scharf sehen (Brillenträger)
Ein wenig unscharf
<b>Pflanzen:</b>
Unrealistische Darstellung der Natur, sowie zu starke Farben der Blätter an den Bäumen
<b>Wasser:</b>
Das Wasser sah an einigen Stellen nicht ganz realistisch aus. Vielleicht hätte man im Uferbereich noch ein paar Pflanzen platzieren können.
Die Wasseranimation war nicht so gut
Wasser sah komisch aus
Die Textur des Wassers welche ein wenig unrealistisch wirkte da sie schnurstracks in eine Richtung bewegte. Lösungsvorschlag: Ich würde vorschlagen die Bewegung der Textur des Wassers mit einem gif zu lösen, welches man ein wenig wabbeln lässt. Dies schaltet man halbtransparent und behält die aktuelle Animation bei. Theoretisch könnte man an die Begrenzung des Flusses noch irgendwie triggern platzieren, damit die Animation der Wasseroberfläche via shader gesagt werden kann: Ändere deine Richtung. Damit würde man allerdings einen Shader brauchen. Wenn man den zweiten Schritt mit dem Shader weglässt, würde diese weitere Textur legendlich das doppelte der poligone von jetzt beanspruchen.
<b>360°-Kuppel:</b>
Hintergrund ein wenig verschwommen
Größenverhältnis:
Man hat sich gefühlt als würde man auf einem Podest stehen.

## Diskussion und Analyse

Obwohl sowohl der Wert des Realismus (siehe Abbildung 46) als auch der Wert der räumlichen Präsenzerfahrung (siehe Abbildung 30) hoch genug ist, um mit dem nächsten Mikrozyklus weiterzufahren, zeigt die Pfadanalyse (siehe Abbildung 57), dass eine Überarbeitung der Umgebung sinnvoll ist. Der Einfluss des räumlichen Situationsmodells auf die Präsenzerfahrung ist ein zentraler Faktor in einer realistischen VR-Lernumgebung, der erfüllt werden sollte, ebenso wie die Optimierung desselben, dass keine Suspension of Disbelief, also das aktive Ausblenden von Störreizen notwendig ist. Auch die qualitativen Rückmeldungen zeigen, dass das Potenzial des angestrebten Realismus trotz hohem Wert noch nicht ganz ausgeschöpft ist und es diverse Verbesserungsmöglichkeiten gibt. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde sich dazu entschieden, das Wasser, die Bäume sowie die 360° Kuppel mit hochwertigeren Assets zu ersetzen und zu überarbeiten.

## Mikrozyklus 2: Bewegungsradius

Der Bewegungsradius ist ein weiterer entscheidender Faktor, der sowohl das räumliche Präsenzerleben als auch das immersive Lernen beeinflusst, aber auch für die Planung und Durchführung im praktischen Alltagsunterricht von hoher Relevanz ist. Es werden drei verschiedene Bewegungsradien untersucht (2x2, 4x4 und 6x6 Meter), die sich mit ihrer Gesamt-Quadratmeterzahl an den Bedarf einer durchschnittlichen Klassengröße in Rheinland-Pfalz sowie den Platzverhältnissen von Din-genormten Schulhallengrößen orientiert. Aus der Theorie wird abgeleitet, dass sich ein größerer Bewegungsradius positiv auf das räumliche Präsenzerleben auswirken kann, da Faktoren wie die Selbstlokation, das räumliche Situationsmodell, die Aufmerksamkeit und das Involvement hierbei beeinflusst werden.

## Soziodemographische Daten

2x2 Meter: Die Geburtsjahre im Radius 2x2 Meter setzen sich aus 20,59 % in 2004, 47,06 % in 2005 und 32,35 % in 2006 zusammen. Das Geschlecht verteilt sich auf 55,88 % weiblich und 44,12 % männlich.

4x4 Meter: Die Geburtsjahre im Radius 4x4 Meter setzen sich aus 17,65 % in 2004, 55,88 % in 2005 und 26,47 % in 2006 zusammen. Das Geschlecht verteilt sich auf 55,88 % weiblich und 44,12 % männlich.

6x6 Meter: Die Geburtsjahre im Radius 6x6 Meter setzen sich aus 11,54 % in 2004, 46,15 % in 2005 und 42,31 % in 2006 zusammen. Das Geschlecht verteilt sich auf 23,08 % weiblich und 76,92 % männlich.

## Ergebnisse der Pfadanalysen 2x2, 4x4 und 6x6 Meter

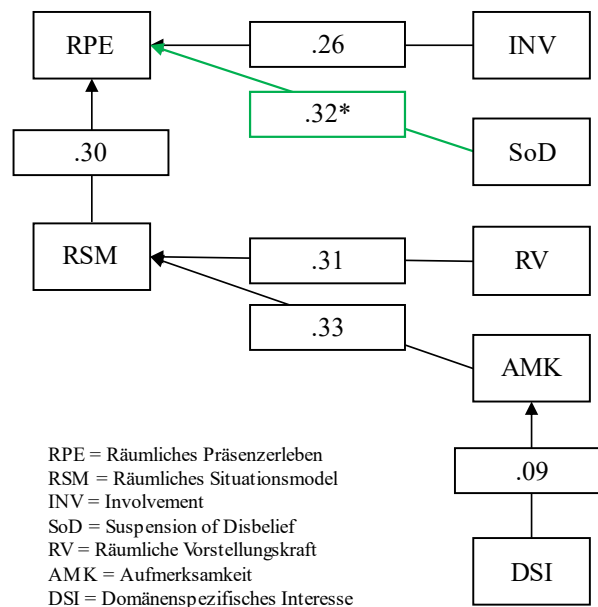


Abbildung 58: Pfadanalyse des 2x2 Meter Radius.

Im Mikrozyklus zwei ( $n = 94$ ) wurden die Bewegungsradien von 2x2 Metern ( $n = 34$ ), 4x4 Metern ( $n = 34$ ) und 6x6 Metern ( $n = 26$ ) untersucht.

In der 2x2-Meter-Gruppe zeigt sich, dass das räumliche Situationsmodell wie in Mikrozyklus eins keinen Einfluss auf die Präsenzerfahrung hatte, ebenso wenig wie das Involvement. Das

räumliche Vorstellungsvermögen und die Aufmerksamkeit hatten ebenfalls keinen Einfluss auf die Bildung des räumlichen Situationsmodells. Die Suspension of Disbelief hingegen beeinflusste die räumliche Präsenzerfahrung weiterhin ( $\beta = .32$ , CI [0.04, 0.59],  $p = .03$ ).

**Tabelle 15: Modellfit-Werte 2x2 Meter. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten.**

<b>TLI</b>	<b>CFI</b>	<b>RMSEA</b>	<b>SRMR</b>	<b>Chi-Quadrat</b>
(>.9)	(>.95)	(<.08)	(<.08)	(>.05)
.71	.826	.103	.115	$p = .198$

Die Modellfit-Werte liegen leicht außerhalb der gewünschten Wertebereiche, weichen aber nur geringfügig davon ab. Die Zusammenhänge innerhalb der Daten werden nur bedingt vom Modell wiedergegeben. Die Modelldaten müssen unter Berücksichtigung dieser Umstände interpretiert werden.

### **Qualitative Daten**

Das qualitative Feedback weist auf eine unrealistische Darstellung der Flora aufgrund der Belichtung hin. Es ist davon auszugehen, dass dies die Suspension of Disbelief beeinflusst hat.

**Tabelle 16: Qualitatives Feedback 2x2 Meter. Zitate der Rückmeldungen.**

Der Boden und das Gras vor mir waren in starkem Kontrast zueinander
Die Hintergründe sahen im Vergleich zur nahen Umgebung zu gut aus und wirkten eher wie Poster
Die Pflanzen waren unterschiedlich belichtet
Schattierung
Unrealistische Anordnungen verschiedener Pflanzen, äußerst eingeschränkte Sichtweise
Unschärf
Der Stein Boden wirkte ein wenig unrealistisch

Beim 4x4-Meter-Radius lässt sich nachweisen, dass das räumliche Situationsmodell die Präsenzerfahrung erstmals signifikant beeinflusst ( $\beta = .48$ , CI [0.22, 0.73],  $p = .004$ ). Das räumliche Vorstellungsvermögen hatte einen positiven Einfluss auf die Bildung desselben ( $\beta = .51$ , CI [0.26, 0.76],  $p = .002$ ).

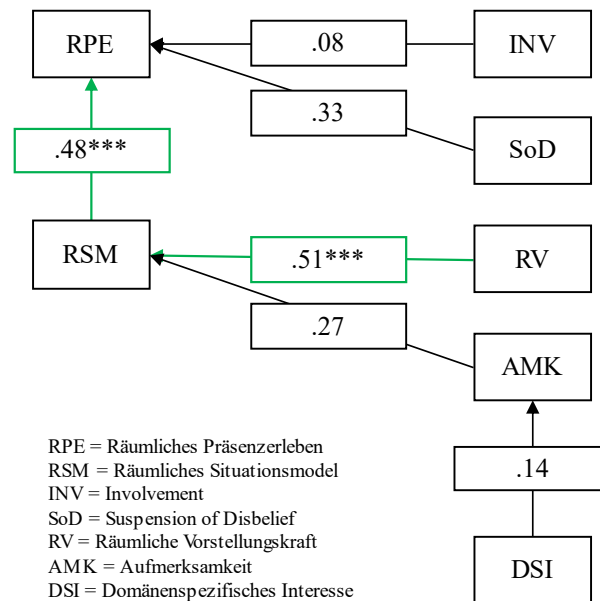


Abbildung 59: Pfadanalyse des 4x4 Meter Radius.

Das qualitative Feedback blieb fast gänzlich aus. Nur die Bäume wurden in Relation zum 16 K HDRI Hintergrund kritisiert.

Tabelle 17: Modellfit-Werte 4x4 Meter. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten.

TLI	CFI	RMSEA	SRMR	Chi-Quadrat
(>.9)	(>.95)	(<.08)	(<.08)	(>.05)
.475	.685	.189	.13	$p = .018$

Die Modellfit-Werte liegen stark außerhalb der gewünschten Wertebereiche. Die Zusammenhänge innerhalb der Daten werden nicht gut vom Modell wiedergegeben. Es gibt sehr wahrscheinlich Zusammenhänge, die nicht spezifiziert sind. Die Modelldaten müssen unter Berücksichtigung dieser Umstände interpretiert werden.

## Qualitative Daten

Tabelle 18: Qualitatives Feedback 4x4 Meter. Zitate der Rückmeldungen.

Bäume im Vordergrund sahen unrealistischer aus, als die im Hintergrund
------------------------------------------------------------------------

Bei den Probanden des 6x6-Meter-Radius konnte kein Einfluss der Subskalen auf die Ausbildung der räumlichen Präsenzerfahrung festgestellt werden.

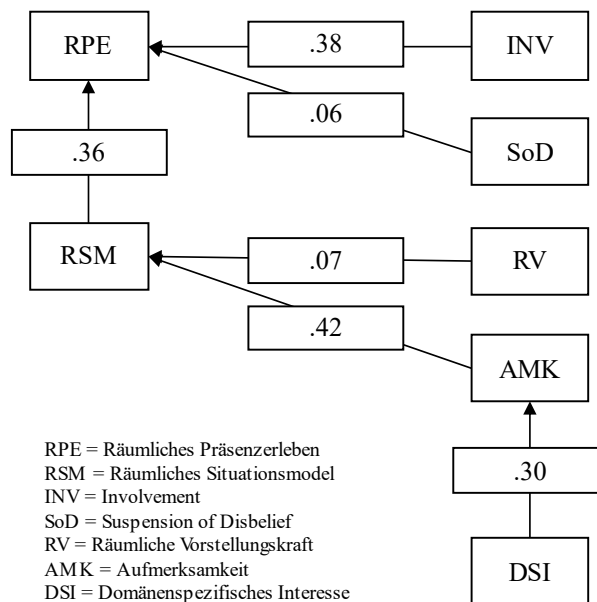


Abbildung 60: Pfadanalyse des 6x6 Meter Radius.

Tabelle 19: Modellfit-Werte 6x6 Meter. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten.

TLI	CFI	RMSEA	SRMR	Chi-Quadrat
(>.9)	(>.95)	(<.08)	(<.08)	(>.05)
.172	.503	.237	.172	$p = .008$

Die Modellfit-Werte liegen stark außerhalb der gewünschten Wertebereiche. Die Zusammenhänge innerhalb der Daten werden nicht gut vom Modell wiedergegeben. Es gibt sehr wahrscheinlich Zusammenhänge, die nicht spezifiziert sind. Die Modelldaten müssen unter Berücksichtigung dieser Umstände interpretiert werden.

### Qualitative Daten

Das qualitative Feedback bezog sich auf eine Unebenheit in der VR, die in der Realität nicht vorhanden war, sowie eine Nutzung ohne benötigte Brille.

Tabelle 20: Qualitatives Feedback 6x6 Meter. Zitate der Rückmeldungen.

Beim Laufen auf den kleinen Hügel neben der Bank hatte es sich so angefühlt, als ob meine Beine in dem Hügel stecken. Auf dem Weg wirkte es natürlich allerdings nicht dort.
Unschärf da ohne Brille



## Ergebnisse des räumlichen Präsenzerlebens

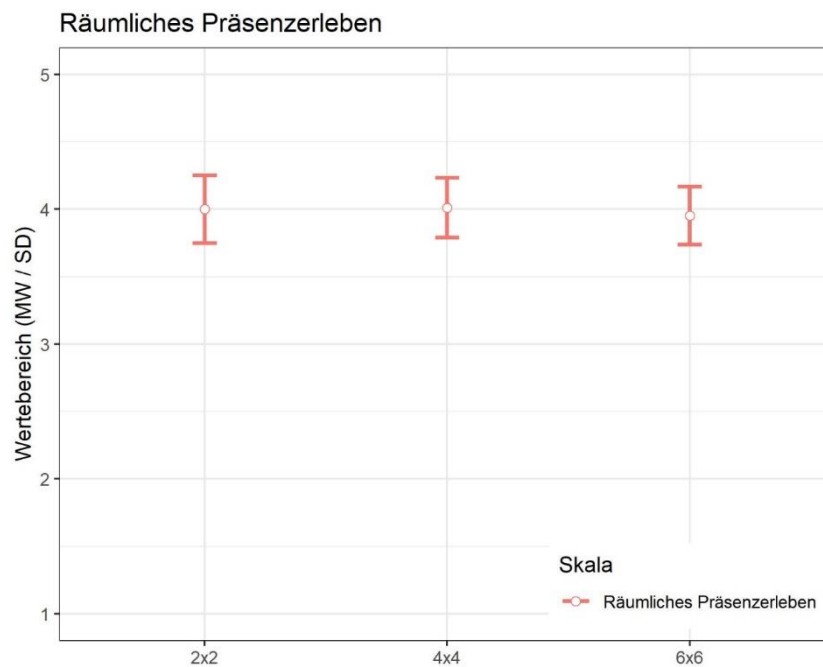


Abbildung 61: Räumliches Präsenzerleben der Bewegungsradien 2x2, 4x4 und 6x6 Meter.

Die Ergebnisse des räumlichen Präsenzerlebens sind zusammen mit den Pfadanalysen ausschlaggebend für die Wahl des Bewegungsradius. Zwischen den Radien ist kein erkennbarer Unterschied festzustellen, weshalb bei der Entscheidung die Ergebnisse der Pfadanalysen maßgeblich sind.

### Diskussion und Analyse der Ergebnisse aller Radien

Beim 4x4 Meter Radius hatte die räumliche Vorstellungskraft einen signifikanten Einfluss auf das räumliche Präsenzerleben. Daraus lässt sich schließen, dass der verdoppelte Radius einen positiven Einfluss auf das mentale Verständnis des Raumes hatte. So konnten auch Probanden mit geringerem Vorstellungsvermögen den Raum besser erfassen, was zu einem signifikanten Einfluss des räumlichen Situationsmodells auf das räumliche Präsenzerleben führt. Im Gegensatz dazu hatte das räumliche Situationsmodell im 2x2m-Radius keinen Einfluss auf das räumliche Präsenzerleben, wie es im Mikrozyklus 1 der Fall war. Der 6x6m-Radius war der Einzige, der überhaupt keinen Einfluss auf die Subskalenwerte zeigte. Die Vergleichbarkeit des 6x6m-Radius ist auch deshalb kritisch zu sehen, weil die Stichprobe kleiner ist als bei den anderen beiden Radien. Aufgrund dieser Umstände wurde der Radius von 4x4 Metern als der vielversprechendste für die weiteren geplanten Zyklen ausgewählt. Er bietet genügend Platz, um interaktive Stationen einzubetten und ist nicht zu groß für eine realistische Umsetzung in einer Schule mit einer ganzen Klasse innerhalb einer Schulsporthalle (siehe Kapitel 3.1). Die Generierung des räumlichen Situationsmodells und die Beeinflussung der Präsenzerfahrung spielten dabei die entscheidenden Rollen, da die geplanten Stationen Interaktionen mit der virtuellen Umgebung erfordern und es daher von Vorteil ist, wenn die Probanden den Raum mental gut erfassen können. Das qualitative Feedback des 2x2 Meter Radius zeigt wahrgenommene Missstände vor allem in den ufernahen Regionen mit den eingefügten Pflanzen. Der Boden, die Anordnung der Pflanzen sowie die Belichtung wurden kritisiert. Ein:e Teilnehmende:r hat

einen Missstand in der Kohärenz des Verhältnisses von 3-D-Modellen zum gewählten Hintergrund festgestellt. Die vermehrten Rückmeldungen bestätigen die in der Pfadanalyse festgestellten signifikanten Auswirkung der Suspension of Disbelief auf das räumliche Präsenzerleben. Im 4x4 Meter Radius wurde nur die Kohärenz zwischen den 3-D-Modellen der Bäume und dem hochauflösenden 16 K 360° Dome kritisiert. Das qualitative Feedback im 6x6 Meter Radius beschränkte sich auf zwei Einträge. Zum einen herrschte eine individuelle Unschärfe vor, zum anderen wurde ein Hügel bemerkt, der so in der Realität natürlich nicht wahrnehmbar ist. In den folgenden Abbildungen wird die Positionierung der einzelnen Stationen mit dem gewählten 4x4 Meter Radius dargestellt.



Abbildung 62: Bewegungsradius für Lernstation 1.

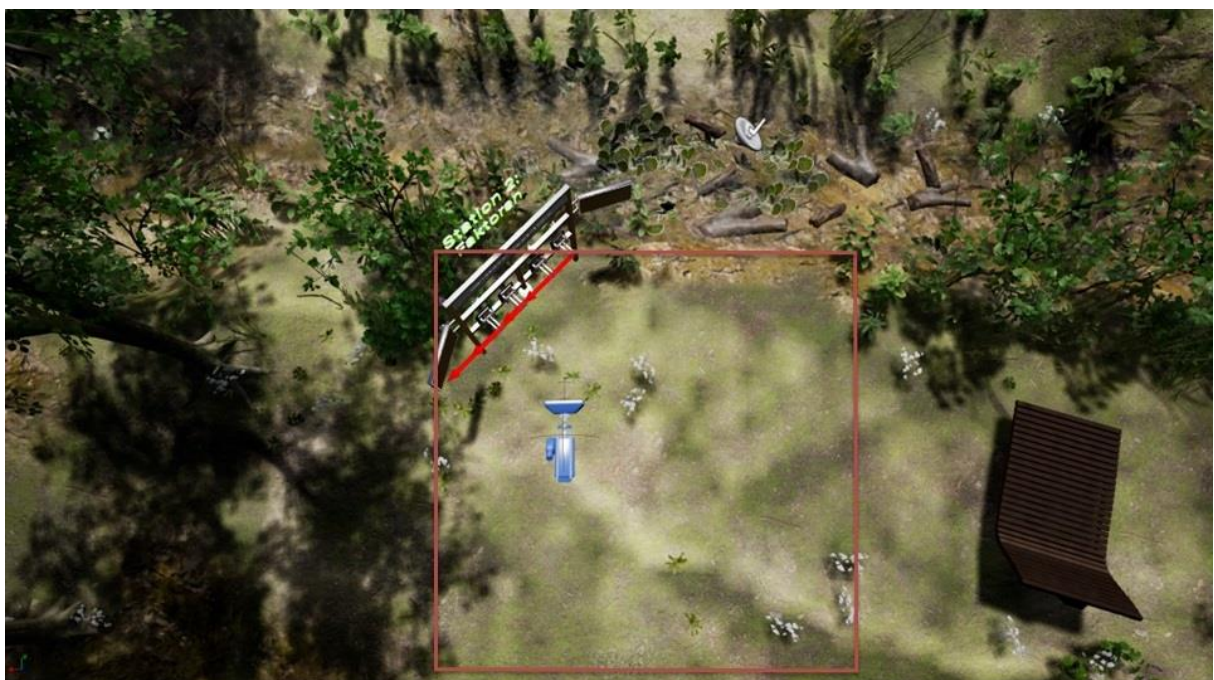


Abbildung 63: Bewegungsradius für Lernstation 2.





Abbildung 64: Bewegungsradius für Lernstation 3.

### **Mikrozyklus 3: Umgebungsgeräusche**

Um die nun bestehende Grundfläche mit dem evaluierten Radius noch realitätsnaher zu gestalten, ist der Einsatz von Umgebungsgeräuschen notwendig. Dies wird mit Soundscapes (siehe Kapitel 2.1) umgesetzt. Es werden Vogelgezwitscher, Bachgeplätscher sowie das Blätterrauschen im Wind eingefügt und mit einer Raumklangfunktion versehen, die eine realistische Veränderung der Lautstärke durch Distanz zur Soundquelle sowie Wahrnehmung (linkes und/oder rechtes Ohr bei Kopfdrehungen) erzeugt. Es wird angenommen, dass dadurch die automatisch gerichtete Aufmerksamkeit auf die Umgebung zunimmt und dadurch das räumliche Situationsmodell beeinflusst wird (siehe Kapitel 2.1). Auch das Involvement kann damit manipuliert werden (siehe Kapitel 2.1 und 2.2).

### **Soziodemographische Daten**

Die Geburtsjahre setzen sich aus 33,78 % in 2005 und 61,22 % in 2006 zusammen. Das Geschlecht verteilt sich auf 40,9 % weiblich und 55,1 % männlich.

## Ergebnisse der Pfadanalyse

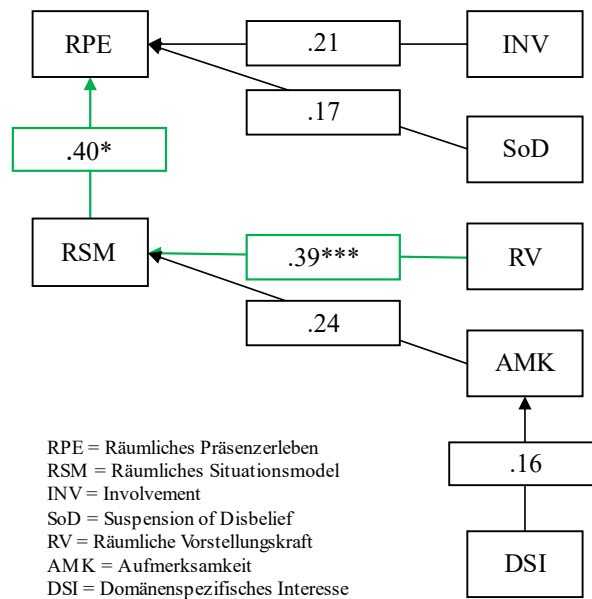


Abbildung 65: Pfadanalyse des Mikrozyklus 3.

Die Pfadanalyse zeigt fast den gleichen Einfluss wie in Mikrozyklus zwei. Die räumliche Präsenzerfahrung wird weiterhin durch das räumliche Situationsmodell beeinflusst ( $\beta = .40$ , CI [0.09, 0.71],  $p = .022$ ). Auch die räumliche Vorstellungskraft beeinflusst noch die Bildung des räumlichen Situationsmodells ( $\beta = .39$ , CI [0.17, 0.60],  $p = .001$ ). Die räumliche Präsenzerfahrung (siehe Abbildung 30) nimmt weiterhin deskriptiv zu.

Tabelle 21: Modellfit-Werte MZ drei. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten.

TLI	CFI	RMSEA	SRMR	Chi-Quadrat
(>.9)	(>.95)	(<.08)	(<.08)	(>.05)
.328	.597	.191	.121	$p = .003$

Die Modellfit-Werte liegen stark außerhalb der gewünschten Wertebereiche. Die Zusammenhänge innerhalb der Daten werden nicht gut vom Modell wiedergegeben. Es gibt sehr wahrscheinlich Zusammenhänge, die nicht spezifiziert sind. Die Modelldaten müssen unter Berücksichtigung dieser Umstände interpretiert werden.

## Qualitative Daten

Das qualitative Feedback zeigt nur eine einzige Rückmeldung zu den Umgebungsgeräuschen.

Tabelle 22: Qualitatives Feedback MZ drei. Zitate der Rückmeldungen.

Ich habe mich darauf konzentriert, ob man das Wasser das man sieht auch hören kann. Das war nicht der Fall.
Man konnte zum Beispiel durch die holzliege gehen, dass ist aber nicht zu umgehen
Raum war bisschen zu klein
Unscharf

## **Diskussion und Analyse**

Aus der Pfadanalyse kann nicht geschlossen werden, dass die realistischen Geräusche einen direkten Effekt auf die Subskala Aufmerksamkeit hatten, da sie keinen Effekt auf das räumliche Situationsmodell hat. Bei einer detaillierten Betrachtung der Ergebnisse der Aufmerksamkeitskala ist ein deskriptiver Anstieg zwischen Mikrozyklus zwei und drei festzustellen, der aber keinen signifikanten Unterschied zwischen Zyklen aufweist (siehe Abbildung 36). Ebenso verhält es sich bei der Subskala Involvement (siehe Abbildung 34). Möglich wäre auch, dass der Einfluss sich auch direkt auf das räumliche Situationsmodell ausgewirkt hat. Es besteht aber auch hier keine signifikante Veränderung, sondern nur ein deskriptiver Anstieg (Abbildung 33). Da sowohl die Aufmerksamkeit, das Involvement als auch das räumliche Situationsmodell von weiteren Faktoren beeinflusst werden kann und die Skalen nicht speziell nach dem Einfluss der Umgebungsgeräusche fragen, ist für die genaue Untersuchung des Einflusses von realistischen Umgebungsgeräuschen auf das räumliche Präsenzerleben eine eigene Skala notwendig, um den Effekt isoliert betrachten zu können. Das räumliche Situationsmodell hat in diesem Zyklus den maßgeblichen Einfluss auf das räumliche Präsenzerleben. In den qualitativen Rückmeldungen wird ersichtlich, dass die Wassergeräusche von einem:r Teilnehmenden nicht laut genug wahrgenommen wurden. Ebenso wurde festgestellt, dass die virtuellen Objekte nicht in der Realität existieren und man hindurchlaufen kann. Auch wurde angemerkt, dass der Bewegungsradius etwas zu klein war und bei einem:r Teilnehmenden eine Unschärfe vorherrschte. Die Unschärfe kann auf Faktoren wie etwa eine falsche Einstellung der Linsen der VR-Brille, eine Sehschwäche oder die Ansammlung von feuchter Atemluft in der VR-Brille durch das Tragen eines Mund-Nasen-Schutzes während der Erhebung zurückgeführt werden. Alle angemerkten Rückmeldungen können sich individuell negativ auf das räumliche Präsenzerleben ausgewirkt haben.

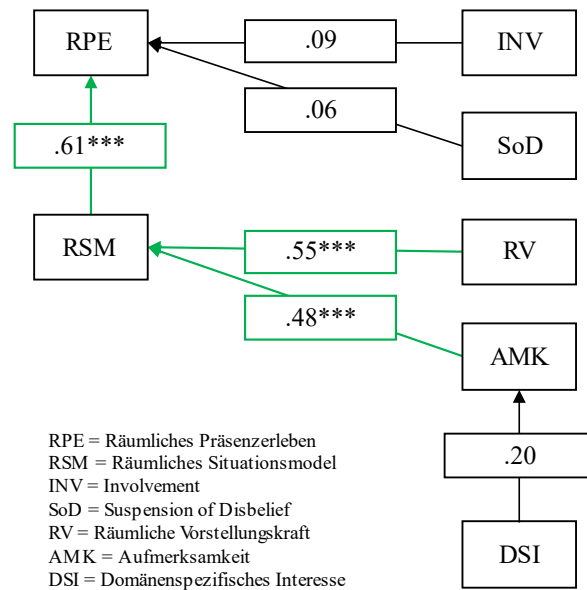
## **Mikrozyklus 4: Lernstation 1 – Messen von CO<sub>2</sub> Ausgasungen**

In Mikrozyklus vier wurde die erste Lernstation bearbeitet. Die Teilnehmenden bekamen virtuelle Hände und auditive sowie visuelle Arbeitsaufträge eingeblendet. Inhaltlich wurde ihnen die Messung von CO<sub>2</sub> aus Fließgewässern nähergebracht (siehe Kapitel 3.4). Sie bauten eine Floating-Chamber zusammen, die sie zum nahe gelegenen Fluss bringen mussten, um dort die Messung durchzuführen.

## **Soziodemographische Daten**

Die Stichprobe in den Zyklen drei bis sechs ist zu jedem Erhebungszeitpunkt identisch. Die Geburtsjahre setzen sich aus 33,78 % in 2005 und 61,22 % in 2006 zusammen. Das Geschlecht verteilt sich auf 40,9 % weiblich und 55,1 % männlich.

## Ergebnisse der Pfadanalyse



**Abbildung 66: Pfadanalyse des Mikrozyklus 4.**

Im Gegensatz zu den vorherigen Mikrozyklen zeigt sich nun, dass die Aufmerksamkeit auch einen signifikanten Effekt auf das räumliche Situationsmodell ausübt ( $\beta = .48$ , CI [0.30, 0.66],  $p < .001$ ). Das räumliche Vorstellungsvermögen beeinflusste auch das räumliche Situationsmodell ( $\beta = .55$ , CI [0.39, 0.72],  $p < .001$ ). Dies wiederum wirkte sich positiv auf die räumliche Präsenzerfahrung aus ( $\beta = .61$ , CI [0.38, 0.83],  $p < .001$ ).

**Tabelle 23: Modellfit-Werte MZ vier. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten.**

TLI	CFI	RMSEA	SRMR	Chi-Quadrat
(>.9)	(>.95)	(<.08)	(<.08)	(>.05)
.715	.829	.184	.14	$p = .005$

Die Modellfit-Werte liegen geringfügig außerhalb der gewünschten Wertebereiche. Die Zusammenhänge innerhalb der Daten werden allerdings nicht gut vom Modell wiedergegeben. Es gibt sehr wahrscheinlich Zusammenhänge, die nicht spezifiziert sind. Die Modelldaten müssen unter Berücksichtigung dieser Umstände interpretiert werden.

## Qualitative Daten

Das qualitative Feedback kritisiert den Bewegungsradius, sowie das angehängte Verbindungskabel von VR-Brille zu Laptop. Die Bildschärfe sowie der Realismus wird thematisiert.

**Tabelle 24: Qualitatives Feedback MZ vier. Zitate der Rückmeldungen.**

Das die Trennwand (Grenze des Bewegungsfeld) bei der Station 1 gestört hat.
Das Kabel hat wie die letzten Male etwas gestört, aber ich denke eine Kabellose VR Alternative ist noch nicht auf dem Markt oder sehr teuer.
Die verschiedenen Gegenstände wirken teils nicht echt. Aber im großen und ganzen doch

---

sehr real z.B. Die Steine und der weg sehen eher nicht so real aus.

---

Nicht ganz scharfes Bild

---

### **Diskussion und Analyse**

Der Einfluss der Aufmerksamkeit auf das räumliche Situationsmodell lässt sich auf die neu implementierten Handlungsmöglichkeiten sowie die klaren Anweisungen und Aufmerksamkeitslenkungen der auditiven und visuellen Aufgaben zurückführen. Durch die erhöhte Bewegungsleistung, die die Teilnehmenden zur Bearbeitung der Station aufbringen müssen, wird die mentale Wahrnehmung und Erfassung des Raumes gestärkt, was sich positiv auf den Einfluss des räumlichen Situationsmodells auf das Präsenzerleben auswirkt. Das Involvement hat trotz Höchstwerten (siehe Abbildung 34) keinen Einfluss auf das räumliche Präsenzerleben, wofür es keine rein aus den Skalen ersichtliche Erklärung gibt. Spekulativ kann gesagt werden, dass das räumliche Situationsmodell wie auch in den Zyklen davor so dominant ist, dass die Eingebundenheit für den Hypothesentest nicht notwendig ist, um die Teilnehmenden davon zu überzeugen, die VR als neue Realität anzunehmen. Im qualitativen Feedback ist zu erkennen, dass der Bewegungsradius etwas größer gewünscht wird und durch die Aktionen das angebundene Kabel gestört hat. Ebenso wurden von einem Teilnehmenden die Gegenstände nur als akzeptabel eingestuft und bei einer weiteren herrschte eine Unschärfe vor. Alle Anmerkungen können sich individuell negativ im Hypothesentest auf das Präsenzerleben ausgewirkt haben. Unter anderem durch die Skala Suspension of Disbelief.

### **Mikrozyklus 5: Lernstation 2 – CO<sub>2</sub> Ausgasung aus Fließgewässern**

In Lernstation zwei ist keine ausschweifende Bewegung durch den Raum notwendig, aber möglich. In dieser Station wird einer der Vorteile, den VR bietet, genutzt: Unsichtbares sichtbar machen. Es geht inhaltlich um das Kennenlernen und Analysieren von verschiedenen Faktoren mittels Variablenkontrollstrategie, die die CO<sub>2</sub>-Ausgasung von Fließgewässern beeinflussen (siehe Kapitel 3.4). Das ausgasende CO<sub>2</sub> wird auf Teilchenebene dargestellt und mit dem Blick durch eine „chemische Lupe“ sichtbar gemacht. Es wird untersucht, wie sich dieser Bruch mit der Realität auf das räumliche Präsenzerleben auswirkt. Das Sichtbarmachen der Animation des CO<sub>2</sub> aus dem Fluss mit Hilfe der CO<sub>2</sub>-Lupe sowie die Manipulation der Umwelt sind die realitätsfernen Interaktionsmöglichkeiten in dieser Station.

### **Soziodemographische Daten**

Die Stichprobe in Zyklen drei bis sechs ist zu jedem Erhebungszeitpunkt vollständig identisch. Die Geburtsjahre setzen sich aus 33,78 % in 2005 und 61,22 % in 2006 zusammen. Das Geschlecht verteilt sich auf 40,9 % weiblich und 55,1 % männlich.



## Ergebnisse: Pfadanalyse

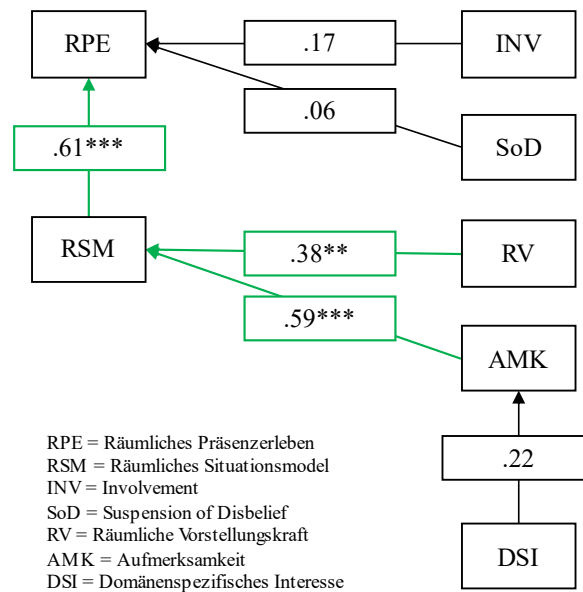


Abbildung 67: Pfadanalyse des Mikrozyklus 5.

Die Pfadanalyse zeigt den Einfluss der visuellen Vorstellung ( $\beta = .38$ , CI [0.14, 0.62],  $p = .002$ ) und der Aufmerksamkeit ( $\beta = .59$ , CI [0.39, 0.79],  $p < .001$ ) auf das räumliche Situationsmodell. Auch hier bleibt der dominante Einfluss des Situationsmodells auf das Präsenzerleben bestehen ( $\beta = .61$ , CI [0.35, 0.87],  $p < .001$ ).

Tabelle 25: Modellfit-Werte MZ fünf. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten.

TLI	CFI	RMSEA	SRMR	Chi-Quadrat
(>.9)	(>.95)	(<.08)	(<.08)	(>.05)
.594	.756	.233	.16	$p < .000$

Die Modellfit-Werte liegen außerhalb der gewünschten Wertebereiche. Die Zusammenhänge innerhalb der Daten werden nicht gut vom Modell wiedergegeben. Es gibt sehr wahrscheinlich Zusammenhänge, die nicht spezifiziert sind. Die Modelldaten müssen unter Berücksichtigung dieser Umstände interpretiert werden.

## Qualitative Daten

Das qualitative Feedback kritisiert eine Fehlfunktion die singulär aufgetreten ist, sowie eine unscharfe Sicht. Auch eine veränderte Wahrnehmung des Untergrundes ist aufgetreten.

Tabelle 26: Qualitatives Feedback MZ fünf. Zitate der Rückmeldungen.

Als Brillenträger war es schwer die VR-Brille aufzusetzen
Auch mit dem Regler war die Schrift nicht richtig scharf
Der Boden war in echt höher als in der VR-Brille
Ich bin Brillenträger und kann die geschriebenen Sachen nicht lesen
Lupe fällt durch den Boden

## **Diskussion und Analyse**

Die Ergebnisse ähneln sehr stark denen von Mikrozyklus vier. Es ist davon auszugehen, dass die Entstehung des Präsenzerlebens gleichermaßen ablief und die Subskalen gleichermaßen beeinflusst wurden. Der Wechsel der Station und damit die Integration von nicht-realen Elementen wie der Sichtbarkeit der Teilchenebene durch die „chemische Lupe“ hatte somit keinen merkbaren Einfluss. Entgegen allen Erwartungen hat das Involvement weiterhin keinen direkten Einfluss. Die angemerkte unscharfe Sicht resultiert zum einen von der Nutzung der VR-Brille mit einer Lese- oder Sehbrille, zum anderen kann dies durch das Tragen der Maske bei der Nutzung einer VR-Brille entstehen. Beim Ausatmen wird durch die Atemmaske der Atem in die VR-Brille umgelenkt, wodurch die Linsen beschlagen können und es so zu einer Unschärfe kommt. Die durch den Boden gefallene Lupe konnte auf einen singulären Fehler zurückgeführt werden, der direkt vor Ort behoben wurde.

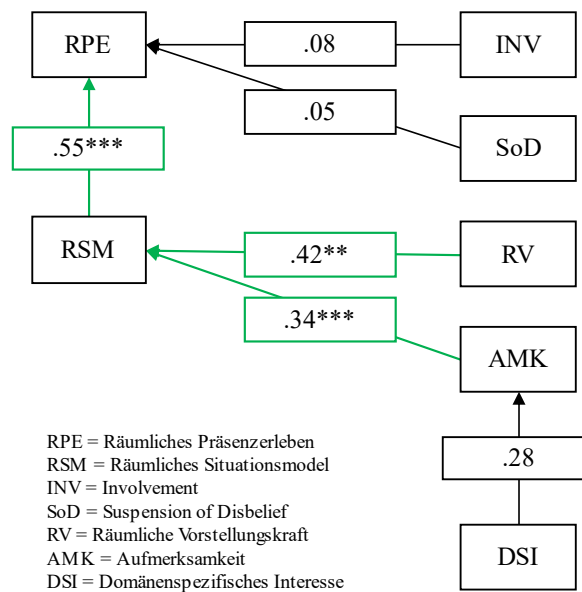
## **Mikrozyklus 6: Lernstation 3 – Wälder und Bäume als CO<sub>2</sub> Senken**

In Lernstation drei wird eine Mischung aus realitätsnahen und -fernen Interaktionsmöglichkeiten bereitgestellt. Mithilfe eines Automaten, der Baumhologramme erscheinen und altern lassen sowie deren Alter und Masse darstellen kann, soll in einem digitalen Pinboard die Wachstums- und CO<sub>2</sub>-Speicherungskurve eingetragen und dargestellt werden. So wird die Möglichkeit, die Umgebung mit realitätsfernen Aktionen manipulieren zu können, mit einer realitätsnahen Arbeitstechnik (dem Anpinnen von Pins an einem Board) verbunden. Anschließend wird ein kurzer Videoclip eingeblendet, der die erarbeiteten theoretischen Grundlagen an einem Praxisbeispiel aus der umweltwissenschaftlichen Forschung im realweltlichen Kontext einbettet. Es wird untersucht, welchen Effekt diese Verknüpfung der Arbeitsweisen auf das räumliche Präsenzerleben hat.

## **Soziodemographische Daten**

Die Stichprobe in den Zyklen drei bis sechs ist zu jedem Erhebungszeitpunkt identisch. Die Geburtsjahre setzen sich aus 33,78 % in 2005 und 61,22 % in 2006 zusammen. Das Geschlecht verteilt sich auf 40,9 % weiblich und 55,1 % männlich.

## Ergebnisse: Pfadanalyse



**Abbildung 68: Pfadanalyse des Mikrozyklus 6.**

Diese Pfadanalyse zeigt ähnliche Ergebnisse wie Mikrozyklus vier und fünf. Aufmerksamkeit ( $\beta = .34$ , CI [0.09, 0.60],  $p = .007$ ) und visuelles räumliches Vorstellungsvermögen ( $\beta = .42$ , CI [0.20, 0.64],  $p = .001$ ) beeinflussen wiederum das räumliche Situationsmodell, das weiterhin die räumliche Präsenzerfahrung beeinflusst ( $\beta = .55$ , CI [0.29, 0.82],  $p = .001$ ). Auch hier spielt das Involvement keine Rolle und der Hypothesentest wird durch das räumliche Situationsmodell dominiert.

**Tabelle 27: Modellfit-Werte MZ sechs. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten.**

TLI	CFI	RMSEA	SRMR	Chi-Quadrat
(>.9)	(>.95)	(<.08)	(<.08)	(>.05)
.576	.746	.177	.11	$p = .007$

Die Modellfit-Werte liegen außerhalb der gewünschten Wertebereiche. Die Zusammenhänge innerhalb der Daten werden nicht gut vom Modell wiedergegeben. Es gibt sehr wahrscheinlich Zusammenhänge, die nicht spezifiziert sind. Die Modelldaten müssen unter Berücksichtigung dieser Umstände interpretiert werden.

### Qualitative Daten

Das qualitative Feedback kritisiert einen singular aufgetretenen Fehler sowie eine Unschärfe der Sicht. Die veränderte Wahrnehmung des Untergrundes ist erneut aufgetreten.

**Tabelle 28: Qualitatives Feedback MZ sechs. Zitate der Rückmeldungen.**

-die Katze hat sich nicht bewegt
Der Boden in echt war tiefer als in der VR
Ich konnte nicht wirklich scharf sehen, obwohl ich es wie möglich eingestellt habe
Nuss geworfen, Aktion nicht getriggert.

## Diskussion und Analyse

Die Ergebnisse von Lernstation drei ähneln denen von Mikrozyklus vier und fünf. Es kann darauf geschlossen werden, dass die Bildung des Präsenzerlebens auf die gleiche Weise funktionierte. Die Zusammenstellung der Lernaufgabe mit unterschiedlichen Interaktionen der Umgebung hatte keinen sichtbar anderen Einfluss. Der dominierende Faktor bleibt das räumliche Situationsmodell im Gegensatz zum Involvement, das über alle Mikrozyklen hinweg das Präsenzerleben nicht beeinflusste. Die kritisierte unscharfe Sicht ist möglicherweise wieder durch das Tragen der Maske zu erklären. Die nicht getriggerte Aktion war ein singulärer Fehler, der verhinderte, dass das Baumhologramm geladen wurde. Durch einen Neustart der Umgebung war dies sofort behoben. Die ungleiche Wahrnehmung des realen und virtuellen Bodens kann entweder auf fehlendes Embodiment, also das Fehlen eines Avatars, oder eine singuläre fehlerhafte Kalkulation der Körpergröße durch die VR-Brille zurückgeführt werden. Alle Anmerkungen können sich negativ auf die Bildung des räumlichen Präsenzerlebens individuell ausgewirkt haben.

## 6 Diskussion der kumulierten Ergebnisse

Aus den zusammengetragenen Ergebnissen lassen sich allgemeine Gestaltungsprinzipien ableiten, um realistische VR-Lernumgebungen für den schulpraktischen Unterricht unter Berücksichtigung der räumlichen Präsenzerfahrung zu gestalten. In diesem Kapitel werden die kumulierten Ergebnisse diskutiert und Gestaltungsprinzipien daraus abgeleitet. Zuerst wird die Bildung des räumlichen Präsenzerlebens in den Mikrozyklen näher betrachtet. Anschließend wird die aktuelle Motivation fokussiert und ihre Rolle in den Mikrozyklen analysiert. Danach werden die Ergebnisse der Skalen Wahrgenommene Bedienbarkeit, Wahrgenommene Lerneffektivität und die VR-Skala diskutiert. Abschließend werden die Werte des FAM analysiert.

Zunächst wird auf die Ergebnisse der Subskalen eingegangen, auf die im Design-Prozess kein Einfluss genommen werden kann, weil es sich um persönliche Eigenschaften handelt, die die Teilnehmenden mitbringen und die während der Erhebung durch unterschiedliche externe Einflüsse geprägt werden können. Dies sind das räumliche Vorstellungsvermögen und das domänenspezifische Interesse. Das räumliche Vorstellungsvermögen steigt über den Verlauf der Erhebung mit einem kleinen Effekt ( $F(5,270) = 2.954, p = .01, \eta_G^2 = .052$ ) an. Dies kann an der Gestaltung des virtuellen Raumes liegen und daran, dass durch die stetig hinzukommenden Komponenten die VR-Umgebung besser mental erfasst werden kann. Möglich ist aber auch, dass ein Gewöhnungseffekt einsetzt, der durch die wiederholte Nutzung der VR auftritt. Die Teilnehmenden können dadurch die Fähigkeit des räumlichen Denkens und der räumlichen Vorstellung trainieren und somit verbessern. Auch möglich ist, dass das räumliche Vorstellungsvermögen durch unbekannte äußere Umstände individuell verbessert wurde. Mögliche Faktoren können Spielekonsolen, Lesen und Schreiben von Literatur oder andere Arten des Imaginieren oder Fantasieren sein (beispielsweise sogenannte Pen-&-Paper Spiele wie Dungeons and Dragons). Auch möglich wäre die biologische Entwicklung während des Heranwachsens. Die Werte des domänenspezifischen Interesses besaßen deskriptiv einen interessanten Verlauf. Es ist zu beobachten, dass zum Zeitpunkt der Demo das Interesse sehr ausgeprägt war und mit dem Start der Erhebung der Grundfläche abfiel. Über den Verlauf der gesamten Erhebung erreichte es jedoch wieder das Ausgangsniveau mit einem kleinen, nicht signifikanten Effekt ( $F(6,369) = 1.528, p = .17, \eta_G^2 = .024$ ). Das hohe ursprüngliche Interesse

kann durch den Neuigkeitseffekt erklärt werden. Die Teilnehmenden hatten zuvor noch keinen Berührungspunkt mit VR im Schulalltag und waren deshalb möglicherweise sehr interessiert an der Thematik und dem Medium. Möglicherweise mehr, als sie üblicherweise sind. Als der Start der Erhebung dann die Erwartung an Spannung und Interaktivität, die das Demoprogramm möglicherweise weckte, nicht erfüllen konnte, könnte das zu einem gewissen Desinteresse oder einer Enttäuschung geführt haben. Das Hinzufügen der Komponenten und der interaktiven Lernstationen kann dazu geführt haben, dass das Niveau von Mikrozyklus 0 wieder erreicht wurde. Es ist aber auch denkbar, dass sich mit dem Verlauf der Erhebung vermehrt mit dem Medium und der Thematik in einem privaten Rahmen beschäftigt wurde und so das domänenspezifische Interesse gesteigert wurde.

Nun werden die Skalen diskutiert, die durch die Designmaßnahmen in den Mikrozyklen manipuliert und direkt beeinflusst werden konnten.

Das Involvement steigt, wie aus der Theorie abgeleitet, über alle Mikrozyklen hinweg mit einem mittleren Effekt ( $F(5,270) = 11.427, p < .001, \eta_G^2 = .175$ ) stetig an und erreicht bei den Lernstationen den Höhepunkt (Abbildung 34). Es zeigt sich, dass alle Maßnahmen zur Authentizität und Realitätsnähe auch zur Stärkung der Eingebundenheit der Teilnehmenden beigetragen sowie die realitätsnahen Aufgaben in den Lernstationen einen positiven Effekt auf das Involvement haben. Daraus lässt sich das erste Gestaltungsprinzip ableiten:

1. Je realistischer und authentischer eine VR-Lernumgebung und ihre Aufgaben sind, desto höher ist das mögliche Involvement der Nutzenden.

Es zeigte sich auch, dass das Involvement mit einem mittleren Effekt ( $r = .425, p < .001$ ) positiv mit dem räumlichen Präsenzerleben korreliert, aber in keinem der Mikrozyklen einen direkten Einfluss darauf hatte. Dies bestätigt die bereits in den Theorien verankerte Schlussfolgerung, dass ein Zusammenhang zwischen Involvement und räumlicher Präsenzerfahrung besteht. Durch den fehlenden Einfluss in den Pfadanalysen können in dieser Studie allerdings keine Rückschlüsse zur Kausalität des Zusammenhangs gezogen werden. Der fehlende Einfluss zeigt, dass der angenommene positive Einfluss des Involvements auf die Hypothesenprüfung in realistischen, hoch immersiven VR-Lernumgebungen nicht gegeben ist, in denen das räumliche Situationsmodell einen starken Einfluss ausübt. Aufgrund der realistischen Umsetzung der virtuellen Umgebung, des entsprechenden real-räumlichen Settings (zum Beispiel Bewegungsfreiheit ohne Hindernisse und ablenkende Reize) und der starken automatischen Aufmerksamkeitszuweisung durch die Hardware kann angenommen werden, dass das räumliche Situationsmodell den Hypothesentest dominiert und ein weiterer Entscheidungsfaktor nicht notwendig ist. Die Korrelation mit großem Effekt ( $r = .521, p < .001$ ) des räumlichen Präsenzerlebens und des räumlichen Situationsmodells stützen diese Schlussfolgerung.

Daraus ergeben sich zwei weitere Gestaltungsprinzipien:

2. Aufgrund der mittleren Korrelation von Involvement und räumlichem Präsenzerleben, aber dem fehlenden Einfluss des Involvements auf die Ausbildung der desselben in realistischen VR-Lernumgebungen, sollten räumliches Präsenzerleben und Involvement getrennt, aber aufeinander abgestimmt geplant werden.
3. Das räumliche Situationsmodell kann durch modernste Hard- und Software so gestärkt werden, dass es das räumliche Präsenzerlebnis in sehr hohem Maße beeinflusst.

Wenn mit dieser Datenlage die Zwei-Prozess-Theorie betrachtet wird (siehe Kapitel 2.1), ist es

möglich, dass bei der Schaffung einer hoch immersiven, realitätsnahen VR-Lernumgebung Typ eins und Typ zwei getrennt voneinander adressiert werden. Typ eins ist das schnell arbeitende, autonome System, das Reaktionen ausführt, die keine anspruchsvollen Denkprozesse erfordern. Die virtuelle Umgebung wird von den Teilnehmenden gut akzeptiert, sodass eine Auseinandersetzung mit ihr in dem für komplexe Probleme vorgesehenen Typ zwei für die Bildung der räumlichen Präsenzerfahrung gar nicht notwendig ist. Die Kapazitäten des Typs zwei können also für anspruchsvolle Tätigkeiten wie die Lernaufgaben genutzt werden. Um diese Theorie vertiefend zu untersuchen, müssten weitere Mikrozyklen zu den Lernstationen durchgeführt werden.

Es zeigte sich, dass das räumliche Situationsmodell der ausschlaggebende Faktor war, der den Hypothesentest in allen Mikrozyklen dominierte und das räumliche Präsenzerleben maßgeblich prägte. In Mikrozyklus eins wurde der Realismus hoch bewertet, aber auch punktuell kritisiert. Die Überarbeitung des Realismus der Assets kann einen positiven Effekt auf die folgenden Mikrozyklen gehabt haben, da die erhöhte Dichte an Pflanzen, die Überarbeitung des Wassers und die zusätzlichen Animationen (z.B. Blätter- und Grasbewegungen) die unmittelbare Nähe der Teilnehmenden in der VR beeinflusst hat. Es kann lebendiger, naturgetreuer und damit gleichzeitig realistischer gewirkt haben, was sich auch durch den fehlenden Einfluss der Subskala Suspension of Disbelief in den folgenden Mikrozyklen mit dem 4x4 Meter Radius zeigt. Der Realismus korreliert mit einem großen Effekt ( $r = .522, p < .001$ ) mit dem räumlichen Präsenzerleben. Die Subskala der Suspension of Disbelief zeigt zwar durchgehend einen mittelmäßigen bis leicht erhöhten Wert mit einem deskriptiven Abfall ab Mikrozyklus drei (siehe Abbildung 35), hat aber keinen signifikanten Einfluss auf den Hypothesentest.

Aus Mikrozyklus zwei können wir schließen, dass der Radius von 4x4 Metern am besten geeignet ist, um die räumliche Präsenzerfahrung zu erzeugen und die räumlichen Beschränkungen in Schulen zu berücksichtigen. Mit ihm ist es möglich, dass mit einer durchschnittlich großen Schulklasse in einer Einzelhalle alle Teilnehmenden gleichzeitig in die VR-Lernumgebung eintauchen können. Allerdings ist die Stichprobengröße für drei unterschiedlich große Bewegungsradien trotz der Aufteilung von vier zehnten Klassen pro Zyklus gering. Es wäre wünschenswert gewesen, mindestens das Doppelte an Teilnehmenden hierfür zur Verfügung zu haben. Die fehlenden signifikanten Einflüsse im Bewegungsradius 6x6 Meter können womöglich hierauf zurückgeführt werden. Je größer die Stichprobe, desto mehr statistische Power ist vorhanden, desto wahrscheinlicher ist es, dass die Skalen die Effekte erkennen und desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Signifikanztest knapp unter der Signifikanzschwelle liegt (Döring et al., 2016). Dies ist in Mikrozyklus zwei besonders hervorzuheben, da die Stichprobengröße im Gegensatz zu den anderen Zyklen geringer ausfiel. Aus den vorliegenden Ergebnissen kann unter Berücksichtigung der möglichen diversen VR-Lernaufgaben und den vor Ort unterschiedlich herrschenden Platzverhältnissen ein allgemeines Gestaltungsprinzip abgeleitet werden:

4. Größere Bewegungsradien sollten tendenziell bevorzugt werden, um das Erlebnis der räumlichen Präsenz zu verbessern, aber die Designenden sollten immer die räumlichen Beschränkungen des Aufstellungsortes berücksichtigen.

Im Mikrozyklus drei ist ein besonderer Fokus auf die Subskala Aufmerksamkeit zu legen. Es ist aus der Theorie (siehe Kapitel 2.1 und 2.2) anzunehmen, dass die Ergänzung von realistischen Hintergrundgeräuschen das Involvement und die automatische Aufmerksamkeit positiv beeinflusst. Die Aufmerksamkeit wird insgesamt mit einem kleinen Effekt ( $F(5,270) = 2.35$ ,

$p = .04$ ,  $\eta^2 = .042$ ) gesteigert, zeigt aber zwischen Mikrozyklus 2 und 3 nur einen kleinen deskriptiven Anstieg. Generell sind die Werte der Aufmerksamkeit schon sehr hoch, was einem möglichen großen Effekt konträr entgegen steht. Das Involvement wird insgesamt mit einem mittleren Effekt ( $F(5,270) = 11.427$ ,  $p < .001$ ,  $\eta^2 = .175$ ) beeinflusst, zeigt allerdings auch nur einen deskriptiven Anstieg zwischen den beiden Zyklen. Die Pfadanalyse zeigt, dass das räumliche Vorstellungsvermögen das räumliche Situationsmodell signifikant beeinflusst und dieses das räumliche Präsenzerleben. Das räumliche Präsenzerleben und die Aufmerksamkeit korrelieren über die gesamte Erhebung mit einem großen signifikanten Effekt ( $r = .537$ ,  $p < .001$ ). Die Effekte lassen keinen konkreten Rückschluss auf die Wirkweise der Umgebungsgeräusche zu. Es ist möglich, dass die Umgebungsgeräusche direkt auf die Bildung des Situationsmodells einwirken. Keine der eingesetzten Skalen erfragt den Effekt von auditiven Reizen dezidiert, weshalb eine isoliertere Betrachtung nicht möglich ist. Um auditive Reize in VR-Lernumgebungen genauer zu untersuchen, sollte der Zyklus mit Skalen und Theorien aus der Kognitionspsychologie wiederholt werden. Beispielsweise kann eine Versuchsreihe mit und ohne Raumklänge sowie unterschiedlichen Soundquellen konzipiert werden. So ist es möglich Rückschlüsse zur Wirkung von Raumklang versus Nicht-Raumklang sowie einzelner Komponenten (Wasser, Vogelgezwitscher, Wind) in Verbindung mit Lernaufgaben zu untersuchen. In dieser Studie musste aufgrund der zeitlichen Limitationen auf eine isolierte Betrachtung verzichtet werden. Der deskriptive Anstieg in den Subskalen reichte für eine Fortsetzung mit dem evaluierten Prototyp, aber nicht für ein allgemeingültiges Gestaltungsprinzip aus.

In Mikrozyklus vier bis sechs wurden die Lernstationen eins bis drei evaluiert. Der bisherige Prototyp wies einen hohen Wert des Präsenzerlebens, des Involvements und des räumlichen Situationsmodells auf. Dies ist die Voraussetzung, um Lernaufgaben zu implementieren und zu evaluieren. Ziel war es, ein hohes räumliches Präsenzerleben zu erzeugen, um dies als „Lern-Katalysator“ nutzen und viele aus der Theorie ersichtlichen Vorteile (siehe Kapitel 2.2) erschließen zu können. Die Stationen wurden nach drei unterschiedlichen Prinzipien designt: 1. Realitätsnahe Aktionen, 2. Realitätsferne Aktionen, 3. Realitätsnah und realitätsfern gemischt. Realitätsfern bedeutet in diesem Kontext die Umsetzung von Begebenheiten, die in der Realität nicht möglich oder sichtbar sind.

Mikrozyklus vier untersuchte Lernstation eins, die sich auf die Wirkung von realitätsnahen Aktionen konzentrierte. Die Skalen Selbstlokation und Handlungsmöglichkeiten (daraus resultierend das räumliche Präsenzerleben), räumliches Situationsmodell und Involvement verzeichnen in diesem Zyklus ihren deskriptiven Höhepunkt. Aus der Theorie lässt sich schließen, dass die Selbstlokation (siehe Kapitel 2.1) durch die Bewegung durch den virtuellen Raum verbessert wurde und damit der Raum mental besser erfasst wurde. Die Informationen der Umwelt als auch der eigenen Bewegung waren überzeugend genug, um das Präsenzerleben positiv zu beeinflussen und für einen hohen Wert der Selbstlokation zu sorgen (siehe Abbildung 31). Die Selbstlokation korreliert mit einem großen Effekt mit dem räumlichen Präsenzerleben ( $r = .925$ ,  $p < .001$ ) Die Skalierung der Assets (Bäume, Gräser, Blätter, Hände) als auch die zurückgelegte Distanz war realitätsgetreu umgesetzt und dies spiegelte sich in den Daten wider. Hieraus können weitere Gestaltungsprinzipien generiert werden:

5. Ein erhöhter Bewegungsradius sowie die Ergänzung von ortsbezogenen, realitätsnahen Geräuschen erhöhen die Selbstlokation und damit das räumliche Präsenzerleben.



6. Realitätsnahe Umweltfaktoren wie Proportionen und Distanzen wirken sich positiv auf das räumliche Präsenzerleben aus und sollten bei der Gestaltung der 3-D-Assets und der virtuellen Welt berücksichtigt werden.

Mit der ersten Lernstation bekamen die Teilnehmenden auch zum ersten Mal ihre „virtuellen Hände“. Diese wurden als geschlechts- und hautneutrale Roboterhände gestaltet, um die Identifizierung für alle Teilnehmenden einheitlich zu gestalten und ein mögliches Problem durch Störfaktoren im Selbstbild (zu kleine/große Hände, falsche Hautfarbe) zu minimieren. Die Subskala Handlungsmöglichkeiten zeigt einen deutlichen Anstieg der Werte nach der ersten Lernstation. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass in den Stationen davor keine Handlungsmöglichkeiten zu Verfügung standen, in der Formulierung der Items aber nach der Wahrnehmung von Handlungsmöglichkeiten gefragt wird. Es ist somit ersichtlich, dass die Umgebung in den Mikrozyklen eins bis drei so überzeugend war, dass die Teilnehmenden bereits ohne konkrete Möglichkeiten und Hand-Modelle davon überzeugt waren, mit der Umgebung zu interagieren. Mit dem Einsatz der Hände und den konkreten Möglichkeiten ist der plötzliche Anstieg der Werte eindeutig erklärbar. Die Handlungsmöglichkeiten korrelieren positiv mit einem großen Effekt mit dem räumlichen Präsenzerleben ( $r = .915, p < .001$ ). Es kann daraus geschlossen werden, dass die realitätsnahen Naturgesetze, die in der VR-Lernumgebung implementiert wurden, nicht gestört haben, gut umgesetzt wurden und die Wahrnehmung der Handlungsmöglichkeiten dadurch möglicherweise positiv unterstützt haben. Der fehlende Ausschlag der Subskala Suspension of Disbelief unterstützt diese Auslegung der Ergebnisse. Hieraus kann ein weiteres Gestaltungsprinzip abgeleitet werden:

7. Realistische Interaktionen und realitätsnahe Naturgesetze für die zu nutzenden Gegenstände steigern das räumliche Präsenzerleben.

In der zweiten Lernstation wurde im Gegensatz zur ersten einer der Vorteile von Lernen in VR eingeführt: Darstellungen von Begebenheiten, die in der Realität nicht sichtbar sind. Nachdem die Werte für eine realistische Lernstation sehr gut ausgefallen sind, galt es nun zu evaluieren wie sich Aktionen und Darstellungen, die in der Realität nicht möglich sind auf das Präsenzerleben auswirken. Da dies einen der vielversprechendsten Vorteile von Lernen in virtueller Realität darstellt, ist eine hohe Werteverteilung der Subskalen wünschenswert, um diese Vorteile zur Konzeption von Lernstationen in das mögliche Interaktionsrepertoire aufnehmen zu können. Das räumliche Präsenzerleben mit seinen beiden Subskalen Selbstlokation und Handlungsmöglichkeiten fallen deskriptiv. Involvement und das räumliche Situationsmodell hingegen steigen deskriptiv an. Da es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Testzeitpunkten gibt und die Werte auch deskriptiv nah beieinander liegen, kann gesagt werden, dass die Einführung der Vorteilen die VR bietet, wie etwa das sichtbar machen von in der Realität unsichtbaren Dingen, keinen negativen, aber auch keinen einer rein realistisch gestalteten Aufgabe gegenüber positiven Einfluss auf das Präsenzerleben hat. Die Subskala Suspension of Disbelief zeigt einen deskriptiven Abfall. Dies zeigt, dass unnatürliche Elemente nicht als Unstimmigkeiten oder Störfaktoren wahrgenommen werden die das Präsenzerleben negativ beeinflussen. Die Ergebnisse von Lernstation drei liegen sehr nahe bei denen von Lernstation zwei und Lernstation eins. Dies bedeutet, dass die Kombination aus realitätsnahen und realitätsfernen Aktionen keinen ausschlaggebenden positiven oder negativen Effekt auf das räumliche Präsenzerleben hat. Hieraus kann ein weiteres Gestaltungsprinzip generiert werden:

8. Bei der Wahl der Interaktionsmöglichkeiten in VR-Lernumgebungen können realitätsferne

und realitätsnahe Aktionen einzeln oder kombiniert gewählt werden, ohne einen negativen Effekt auf das räumliche Präsenzerleben auszuüben. Es sollte jedoch stets beachtet werden, dass die Interaktionen und Angebote optisch als auch inhaltlich kohärent in die Umgebung eingefügt werden, um die Authentizität nicht zu gefährden.

Es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Lernstationen in den Subskalen, weshalb davon auszugehen ist, dass alle Lernstationen einen ähnlichen Effekt auf das Präsenzerleben und die dafür notwendigen Faktoren haben. In den sehr ähnlich ausfallenden Pfadanalysen der Lernstationen wird sichtbar, dass das räumliche Situationsmodell die Bildung des Präsenzerlebens dominiert. In den Zyklen beeinflusst die Aufmerksamkeit die Bildung des Situationsmodells signifikant. Es ist legitim anzunehmen, dass der Wechsel der Arbeitsstationen im Raum (Station eins) als auch die auditiven und visuellen Anleitungen (Stationen eins bis drei) und die eingeführten Handlungsmöglichkeiten (Station eins bis drei) die automatische und die kontrollierte Aufmerksamkeit erhöht haben. Die Subskala Aufmerksamkeit stützt dies und erreicht bei den Stationen die deskriptiven Höhepunkte. Hieraus kann ein weiteres Gestaltungsprinzip abgeleitet werden:

9. Um die automatische und kontrollierte Aufmerksamkeit der Nutzenden in einem hohen Maß auf die VR-Lernumgebung zu lenken, sollten Bewegungsmöglichkeiten, auditive und visuelle Reize als auch Handlungsmöglichkeiten kombiniert werden.

In den Lernstationen wurden die Skalen Wahrgenommene Bedienbarkeit, Wahrgenommene Lerneffektivität und die VR-Skala eingesetzt. Die wahrgenommene Bedienbarkeit hat keinen ersichtlichen Effekt, nur einen deskriptiven Abfall mit erneutem Anstieg zwischen den Messzeitpunkten. Die Werte der Mikrozyklen befinden sich deskriptiv in der Nähe der Oculus Quest Demo (siehe Abbildung 47). Dies zeigt, dass sich die Wahrnehmung der Interaktionen durch die Teilnehmenden auf einem professionellen Niveau befindet und keiner direkten Verbesserung bedarf. Die wahrgenommene Lerneffektivität steigt deskriptiv von Station eins bis Station drei mit einem kleinen, nicht signifikanten Effekt an. ( $F(2,144) = 1.629, p = .2, \eta^2 = .022$ ). Die hohen Ausgangswerte zeigen, dass die allgemeine wahrgenommene Lerneffektivität von Lernmaterialien in VR als sehr hoch angesehen wird. Es ist möglich, dass der kleine Effekt entweder durch die Bearbeitung von drei Stationen auftritt. Ebenso ist möglich, dass es von den Inhalten der Lernstationen abhängt und Station 3 mit den gemischten Aktivitäten als am effektivsten angesehen wird. Da keine qualitativen Daten hierfür vorliegen, kann darüber keine finale Aussage getroffen werden. Die VR-Skala erhebt den wahrgenommenen Einfluss von virtueller Realität und den darin befindlichen 3-D-Objekten sowie den Umgang mit denselben und deren Realismus auf das subjektive Lernen. Es zeigt sich, dass die virtuelle Umgebung, die realistische Darstellung sowie mögliche Manipulation (beispielsweise aufheben, drücken) der Gegenstände von den Teilnehmenden als sehr motivierend wahrgenommen wird. Die Skala steigt deskriptiv ohne signifikanten Effekt an, was allerdings auf die Höchstwerte zurückgeführt werden kann. Die hohen Werte in allen drei Stationen unterstützen die Annahmen und Ergebnisse, dass realistische Darstellungen und Interaktionen in VR-Lernumgebungen sich positiv auf das räumliche Präsenzerleben als auch die Motivation auswirken.

Insgesamt lässt sich durch die aufbauende Authentizität der VR-Lernumgebung und die nachhaltige Steigung der Werte in den Mikrozyklen sowie die gefundene Korrelation von Involvement und räumlicher Präsenz schlussfolgern, dass die Aspekte (1) realistische Gestaltung der Umgebung (Assets und Animationen), (2) angemessener Bewegungsumfang und (3)

realistische Umgebungsgeräusche wichtige Faktoren bei der Generierung einer realistischen VR-Lernumgebung in ihrer Gesamtheit darstellen. Daraus lässt sich ein weiteres Gestaltungsprinzip ableiten:

10. Um realistische VR-Lernumgebungen zu planen und zu gestalten, sollten die visuellen, auditiven und kinästhetischen Sinne an die realistische Umgebung angepasst werden.

Ein wichtiger Faktor bei der Bearbeitung der Mikrozyklen ist die Einstellung der Teilnehmenden, bevor sie daran teilnehmen. Aus der Theorie wird ersichtlich, dass die Bildung des räumlichen Präsenzerlebens von vielen subjektiven Faktoren abhängt, wie unter anderem die Motivation. Mit geringer Motivation können störende Faktoren verstärkt wahrgenommen, gestellte Aufgaben schlechter bearbeitet, der Raum willentlich nicht mental erfasst und dadurch die wichtigen Faktoren wie das räumliche Situationsmodell und das Involvement für den Hypothesentest negativ beeinflusst werden. Im Fragebogen zur aktuellen Motivation (FAM) werden vier Faktoren postuliert, die zusammen die aktuelle Motivation wiedergeben: Interesse, Herausforderung, Erfolgswahrscheinlichkeit und Misserfolgsbefürchtung. Der FAM wurde auch in Mikrozyklus null verwendet, um die Entwicklung des Neuigkeitseffekts zu untersuchen. Einzeln betrachtet steigt das Interesse mit einem kleinen, um .01 nicht signifikanten Effekt ( $F(6,369) = 2.111, p = .051, \eta_G^2 = .033$ ) an, nachdem es von Mikrozyklus null zu eins deskriptiv absank. Der Theorie nach müsste das Interesse im Verlauf der Erhebung absinken, damit die anfänglich hohen Werte als Neuigkeitseffekt bezeichnet werden können. Konträr dazu steigt das Interesse über den Verlauf der Erhebung an und somit kann der Neuigkeitseffekt ausgeschlossen werden. Es scheint ein steigendes Interesse am Einsatz und der Arbeit in der virtuellen Realität zu bestehen. Die Misserfolgsbefürchtung sinkt insgesamt mit einem signifikanten mittlerem Effekt:  $F(6,376) = 5.48, p < .001, \eta_G^2 = .18$ . Dies kann mit einem Gewöhnungseffekt zusammenhängen, der durch den wiederholten Einsatz zustande kommt. Es ist möglich, dass die Teilnehmenden sich im Umgang mit der VR sicherer fühlen und die Angst vor Misserfolg bei der Bewältigung der Aufgabe sinkt. Auch bei den Lernstationen sanken die Werte weiter deskriptiv. Dies zeigt, dass die Veränderung der Aufgabenstellung von Beobachtungs- zu Bearbeitungsauftrag (Mikrozyklus eins bis drei zu vier bis sechs) keinen Einfluss auf das Misserfolgsbefürchtung der Teilnehmenden hatte. Dies kann in direktem Zusammenhang mit dem steigenden Interesse stehen. Interesse und Misserfolgsbefürchtung korrelieren mit einem mittleren, negativen Effekt ( $r = -.486, p < .001$ ).

Die Herausforderung sinkt ( $F(6,369) = 3.048, p = .006, \eta_G^2 = .047$ ) mit einem kleinen, signifikanten Effekt. Die Herausforderung korreliert allerdings nicht signifikant mit der Misserfolgsbefürchtung. Dies schließt die Annahme, dass wenn die Aufgabe als weniger herausfordernd angenommen wird, die Misserfolgsbefürchtung sinkt, aus. Die Standardabweichung der Herausforderung ist sehr hoch. Das zeigt, dass es eine große Verteilung bei der Bewertung innerhalb der Stichprobe gibt. Die größte Standardabweichung des FAM besitzt die Erfolgswahrscheinlichkeit. Mit einem durch die ganze Erhebung hinweg mittelmäßigen Wert, aber einer extremen Standardabweichung zeigt es, dass die Teilnehmenden sich nicht sicher sind, ob sie die Aufgabe mit ausreichend Erfolg bearbeiten können. Die Erfolgswahrscheinlichkeit korreliert nur mit der Herausforderung mit einem kleinen Effekt ( $r = .114, p = .02$ ). Dies wiederum schließt die Vermutung aus, dass die Teilnehmenden eher dazu neigen, bei einer geringen Misserfolgsbefürchtung auch die Erfolgswahrscheinlichkeit gering einzuschätzen.

Der Anstieg des Interesses stützt die Ergebnisse von Huang et al. (2021) und lässt die Formulierung eines weiteren Gestaltungsprinzips zu:

11. Die mehrfache Nutzung einer VR-Lernumgebung sollte bei der Planung berücksichtigt werden, da dies das Interesse der Teilnehmenden steigern und die Misserfolgsbefürchtung senken kann.

Die Wahrnehmung der Störung durch das an die VR-Brille angeschlossene Kabel variierte zwischen den Mikrozyklen stark (siehe Abbildung 53). In Mikrozyklus zwei mit dem Bewegungsradius 2x2 Meter ist diese wahrgenommene Störung am höchsten ausgeprägt, wohingegen sie bei 6x6 Meter am niedrigsten ist. Dies kann daran liegen, dass durch den hohen Bewegungsradius das Kabel eher hinter den Teilnehmenden während der Bewegung lag und sie nicht so oft mit ihm in Berührung kamen. Bei einem Radius von 2x2 Meter wird sich häufiger um die eigene Achse gedreht und bemerkt das Kabel somit tendenziell öfter. In den Lernstationen zwei und drei liegt der prozentuale Anteil des Störens nur bei 32.65 %. Dies kann damit erklärt werden, dass die Teilnehmenden durch die Aufgaben sehr auf die VR-Umgebung fokussiert waren und somit möglicherweise das Kabel weniger aktiv bemerkt haben. Ein Zusammenhang zwischen Involvement, räumlichem Präsenzerleben und Bemerkten des Kabels ist möglich. Eine Kausalität kann anhand der Datenlage aber nicht bestätigt werden. Aus den vorliegenden Daten lässt sich ein Gestaltungsprinzip ableiten:

12. In VR-Lernumgebungen mit Bewegungsradien von 4x4 Metern oder weniger, sollte nach Möglichkeit auf die Verwendung eines Verbindungskabels von der VR-Brille zu beispielsweise einem Endgerät oder einer Steckdose verzichtet werden.

Auf Basis der Ergebnisse und der zwölf formulierten Gestaltungsprinzipien lässt sich schlussfolgern, dass eine VR-Lernumgebung für den schulpraktischen Alltag ein gewinnbringendes Lernmittel darstellen und die Motivation sowie die wahrgenommene Lerneffektivität steigern kann. Für die Erstellung bedarf es versierte Programmierende, die in enger Zusammenarbeit mit den Forschenden und/oder Lehrenden arbeiten, um sowohl die Erhebung mit der Zielgruppe durchführen zu können als auch um Informationen über die Platzverhältnisse und Lernziele zu erhalten. Es ist wichtig, dass in den verschiedenen Bereichen, die diese Erhebung untersucht hat, vertieft geforscht wird, um wichtige Facetten auszuleuchten und den Effekt der Komponenten noch isolierter zu betrachten.

### **Modell-Respezifikation des räumlichen Präsenzerlebens**

Die Ergebnisse der Pfadanalysen und die bisherige Diskussion zeigen, dass es innerhalb der erhobenen Daten Strukturen gibt, die von dem gewählten Modell nicht abgedeckt werden oder das Modell so wie es ursprünglich aufgestellt wurde, nicht optimal zu den Daten passt. Bei den folgenden Ausführungen muss immer mitbedacht werden, dass die Stichprobengröße eine wichtige Rolle bei Strukturgleichungsmodellen und Pfadanalysen spielt (siehe Kapitel 4.2). Bei kleinen Stichprobengrößen ist es möglich, dass Effekte nicht abgedeckt sind, die bei größeren Stichprobengrößen auftreten können, da die Werte großer Stichproben immer näher an denen der Gesamtpopulation liegen und die von kleineren weiter darum gestreut sind (Gravetter & Wallnau, 2017). Die Abweichung der Daten zum Modell kann auf das genutzte Medium (VR) zurückzuführen sein. Der MEC SPQ wurde mit vier Medien getestet: Text, Film, Hypertext (interaktive Website) und einer VR-Umgebung (Vorderer et al., 2004). Aus der Publikation von

Wirth et al. (2008) geht hervor, dass die zur Evaluierung des Prozessmodells genutzten virtuellen Umgebungen mit der heutigen Verwendung und Leistungsfähigkeit moderner VR-Brillen nicht viel gemeinsam hatten. Es wurde zwar in einer virtuellen, stereoskopisch dargestellten Umgebung navigiert, allerdings passiv-stereoskopisch mit sogenannter rear-projection (Rückprojektion) (ebd.). Diese Systeme funktionieren so, dass das Bild von zwei Beamern auf die Rückwand eine Leinwand projiziert wird, sodass die Person vor der Leinwand die Projektion richtig herum sehen kann (Majernik, 2013). Der stereoskopische Effekt, (der dreidimensionale Reiz wird für jedes Auge einzeln erzeugt) findet mithilfe einer speziellen Brille statt (ebd.). Diese kann beispielsweise rot-blau eingefärbt sein und die Projektion ist dementsprechend mit einer Mischung aus roten und blauen Bildern konzipiert die auf die zwei Beamer aufgeteilt wird (ebd.). So erhalten die Augen eine unterschiedliche Perspektive und das Gehirn verarbeitet den 3-D-Effekt (ebd.). In der Evaluation des MEC SPQ wurde eine solche Technik eingesetzt und die Teilnehmenden erlebten so eine Tour durch das Mozartmuseum (Wirth et al., 2008). Zum Abgleich der externen Validität wurde dieselbe Technik angewendet und die Teilnehmenden durchliefen einen Inka-Tempel, der mithilfe des Doom-3-Videogame-Editors gestaltet wurde (ebd.). Es wird nun ersichtlich, dass die technischen Gegebenheiten während der Evaluation der Messinstrumente nicht mit den modernen VR-Brillen vergleichbar sind. Durch die Distanz zwischen den Teilnehmenden und der Leinwand kann zwar Immersion erzeugt werden, aber diese ist sehr wahrscheinlich auf der technischen Ebene um ein Vielfaches schlechter als die der modernen VR-Brillen. Nicht nur ist die Software zwei Jahrzehnte älter und deshalb sind die Grafik und Assets weniger realistisch, ebenso ist es den Teilnehmenden möglich, die Immersion durch ein bloßes Wegschauen von der Leinwand zu stören. Ein hohes Präsenzerleben kann über eine solche Technik nur möglich sein, wenn die Teilnehmenden den präsentierten Inhalt ununterbrochen konsumieren und keine Störreize in den Raum der Durchführung dringen. Durch die postulierte Theorie des Prozessmodells können Störreize von außen oder aktive Handlungen das Präsenzerleben verschlechtern (Wirth et al., 2007). Das bedeutet wenn Teilnehmende wegschauen, ist der Prozess gestört. Bei modernen Geräten ist ein Wegschauen als solches nicht möglich, da die Brille mit Projektionsfläche (Bildschirmen) direkt auf dem Kopf sitzt und so gestaltet ist, dass nur ein aktives Schließen der Augen (wie in der Realität) die Wahrnehmung und damit das Präsenzerleben stören kann. Ebenso sind die auditiven Reize durch kleine Lautsprecher direkt in Ohr-Nähe angebracht, sodass das Risiko, störende Geräusche wahrzunehmen, stark minimiert wird. Bei einem projektionsbasierten System ist davon auszugehen, dass Lautsprecher genutzt wurden, was das System anfälliger für die Durchlässigkeit störender Geräusche macht. Insgesamt kann also geschlussfolgert werden, dass moderne VR-Brillen mit leistungsfähigen, modernen Engines (wie der Unreal Engine) und moderner Hardware nur bedingt vergleichbar sind mit den Systemen zum Zeitpunkt der Evaluation des MEC SPQ. Die modernen Systeme sind invasiver und damit ist es dem Nutzenden nahezu unmöglich, sich gegen die technische Immersionserzeugung des Gerätes zu wehren. Dies wirft die Frage auf, ob das postulierte Prozessmodell mit den modernen Systemen genauso funktioniert oder ob die Variablen, die beim Entstehungsprozess beteiligt sind, sich nicht möglicherweise anders beeinflussen. Beispielsweise wäre es durch die Nutzung der modernen Systeme eine logische Schlussfolgerung, wenn die automatische und kontrollierte Aufmerksamkeit nicht nur auf das räumliche Situationsmodell, sondern auch direkt auf das räumliche Präsenzerleben und die Eingebundenheit wirkt. Die immersive Wirkung und unumgehbare visuelle sowie

auditive Reizerfahrung könnten entscheidende Einflüsse auf den Hypothesentest haben, da die Entscheidung für den primären Lokalisationsrahmen nicht nur kognitiv getroffen wird, sondern nun auch eine physische Dimension bekommt. Die visuelle Wahrnehmung wird nun ohne Ausweichmöglichkeit auf den virtuellen Raum fokussiert. Dies wird von den gefundenen und bereits diskutierten Ergebnissen zu den Gestaltungskriterien wie etwa den stetig signifikanten Einfluss des räumlichen Situationsmodells gestützt.

Darauf aufbauend muss die Rolle des kognitiven Involvements auf den Hypothesentest näher betrachtet werden. Die Ergebnisse zeigen, dass es keinerlei Einfluss auf das räumliche Präsenzerleben hatte. Es gilt den Zusammenhang von Involvement und räumlichem Präsenzerleben vor dem Hintergrund der Zwei-Prozess-Theorie näher zu betrachten.

Hofer et al. (2020) haben in einer VR-Studie untersucht, wie sich Plausibilität auf das räumliche Präsenzerleben auswirkt. Sie fokussieren sich auf die externe Plausibilität, die auf die Beurteilung visueller Reize aufbaut (ebd.). Eine virtuelle Umgebung ist demnach plausibel, wenn sie nach dem subjektiven Empfinden des Nutzenden realistisch aussieht und sich realistisch verhält (ebd.). Sie nehmen an, dass durch die subjektive Einschätzung der Plausibilität das Präsenzerleben beeinflusst werden kann (ebd.). Es ist ihrer Ansicht nach möglich, dass Plausibilität in Typ zwei abläuft und Typ eins Prozesse regulieren kann (ebd.). Dies hängt aber davon ab wie stark das Präsenzerleben in Typ eins automatisch generiert wird (ebd.). Für ihrer Studie wurde ein realistisches Wohnzimmersetting gewählt, das in der Experimentalgruppe unplausibel verändert wurde (beispielsweise das Bett an der Wand anstatt auf dem Boden). Genutzt wurde eine Oculus Rift, die in ihrer Leistungsfähigkeit stärker ist als die genutzte Oculus Quest in diesem Projekt. Es wurde festgestellt, dass es keinen Unterschied im Präsenzerleben zwischen einer Umgebung mit geringer und hoher Plausibilität gibt (ebd.). Teilnehmende in unplausiblen Umgebungen fühlten sich genauso präsent wie in plausiblen (ebd.). Es gab keine Auswirkungen auf die Subskalen Selbstlokation und Handlungsmöglichkeiten, die das räumliche Präsenzerleben bilden (ebd.). Dies stützt zum einen die in den Pfadanalysen dieses Forschungsprojekts gefundenen Ergebnisse der Dominanz des Spatial Situation Models auf den Hypothesentest, zum anderen wirft es ebenfalls die Frage nach der Verortung des kognitiven Involvements im Prozessmodell auf. Sowohl in diesem Forschungsprojekt als auch in der Studie von Hofer et al. (ebd.) hat das Involvement (beziehungsweise Involvement bezogene Prozesse) keine Auswirkung auf das räumliche Präsenzerleben direkt. Das Involvement und die Typ zwei bezogenen Prozesse haben also wahrscheinlich einen anderen kausalen Wirkpfad im Prozessmodell des räumlichen Präsenzerlebens. Hierfür wird die Beziehung zwischen Involvement und Aufmerksamkeit genauer betrachtet.

Celsi & Olson (1988) haben in einer Studie herausgefunden, dass Involvement bei den Aufmerksamkeits- und Verstehensprozessen eine relevante Rolle spielt und Hinweise dafür gefunden, dass das Involvement im Zusammenspiel mit dem Kriterium persönlicher Relevanz daran beteiligt war, die Aufmerksamkeit zu erhöhen. Behe et al. (2015) fanden Ergebnisse, die diese Studie stützen. Durch einer Studie im Einzelhandel fanden sie mithilfe von Eye-Tracking heraus, dass Teilnehmende mit einem hohen Involvement gegenüber einem Produkt (sogenanntes Produktinvolvement, welches die persönliche Relevanz widerspiegelt), seinen Informationen mehr Aufmerksamkeit schenkten (ebd.). Dies resultierte in einer kontrollierten Aufmerksamkeit mit höherer Fixationszahl sowie einer längeren Gesamtfixationsdauer und einer längeren Gesamtbesuchdauer (ebd.). Der Prozess Aufmerksamkeit zu kontrollieren wird auf der

Grundlage der eigenen Absichten initiiert (McBride & Cutting, 2019). Eigene Absichten und persönliche Relevanz können eng miteinander verknüpft werden, da wenn man etwas für sich persönlich als relevant empfindet, man in der Regel auch Absichten dafür hat. Es wird zudem argumentiert, dass ein hohes Maß an Involvement zu einer stärkeren Verarbeitung von Informationen führt was als guter Prädiktor für Absichten und Verhalten gilt (Cooke & Sheeran, 2004). Für die Bildung des räumlichen Präsenzerlebens in VR-Lernumgebungen bedeutet dies, dass sich Involvement, Absichten und persönliche Relevanz gegenseitig beeinflussen. Diese wiederum bilden die Grundlage dafür Aufmerksamkeit zu kontrollieren. Die kontrollierte Aufmerksamkeit kann als kognitiv anspruchsvoller Prozess in Typ zwei verortet werden und hat einen Anteil an der Bildung des räumlichen Situationsmodells (zusammen mit der automatischen Aufmerksamkeit), das in Typ eins gebildet wird (Hartmann et al., 2005). Demnach lässt sich schlussfolgern, dass Involvement nicht auf das Präsenzerleben, sondern auf die Aufmerksamkeit wirkt.

Das wirft außerdem die Hypothese auf, dass eine höhere persönliche Relevanz der VR-Lernumgebung zu einer intensiveren kognitiven Auseinandersetzung mit deren Inhalten führt und dadurch eine höhere kontrollierte Aufmerksamkeit erzeugt. Ebenfalls unterstellt es, dass die persönliche Relevanz eine entscheidende Rolle in der Erzeugung von räumlichem Präsenzerleben spielen kann. Studien in der Bildungsforschung unterstützen diese Hypothese. Sie zeigen auf, dass für Lernende als relevant wahrgenommener Lernstoff motivieren, das Interesse und Engagement steigern sowie das langfristige Verankern von Wissen fördern kann (Wagner et al., 2021). Diese Faktoren sind auch für die Bildung des räumlichen Präsenzerlebens relevant (Hartmann et al., 2015). Allerdings wird der Relevanzbegriff gerade in den naturwissenschaftlichen Fächern noch zu divers genutzt und häufig mit Interesse synonym verwendet (Stuckey et al., 2014). Es kann beispielsweise zwischen individuellen, gesellschaftlichen und beruflichen Dimensionen der Relevanz unterschieden werden (ebd.). Es braucht hier eine vertiefende Differenzierung und Ausarbeitung des Relevanzkonstrukts ebenso wie eine Skala, um es zu messen und im Prozessmodell einzuführen.

Wenn diese Annahmen und Ergebnisse nun in die Zwei-Prozess-Theorie einordnet, kann die Wirkung des Involvements, das in Typ zwei (also dem langsam arbeitenden Bereich für komplexe Denkprozesse) verortet wird, möglicherweise als regulierender Einfluss auf die kontrollierte Aufmerksamkeit verstanden werden. Durch die höherwertige kognitive Auseinandersetzung mit der Umgebung und den dort verankerten Stimuli wird die kontrollierte Aufmerksamkeit verstärkt, was zu einer intensiveren Auseinandersetzung mit der gesamten Umgebung führt und dadurch Typ eins und die Bildung des Situationsmodells verstärkt. Eine solche Annahme, nämlich das Typ zwei Prozesse Typ eins in VR beeinflussen können treffen auch Hofer et al. (2020).

Dies lässt zu, dass das Prozessmodell des räumlichen Präsenzerlebens in die Typen eins und zwei eingeordnet werden, die sich wechselseitig beeinflussen. Ein Prozess, der in Typ eins abläuft, auf den visuellen und auditiven Reizen basiert und im räumlichen Präsenzerleben mündet. Ein anderer, der in Typ zwei stattfindet und die aktive Auseinandersetzung mit den Reizen aus Typ eins verarbeitet und vom räumlichen Präsenzerleben beeinflusst werden kann. Dies bildet eine wechselseitige Beeinflussung durch externe Reize aus Wahrnehmung → Verarbeitung → Verstärkung/Verminderung → Wahrnehmung → und so weiter. Diese Verstärkung/Verminderung kann auch durch die willentliche Ausblendung von Störreizen (Suspension of Disbelief)

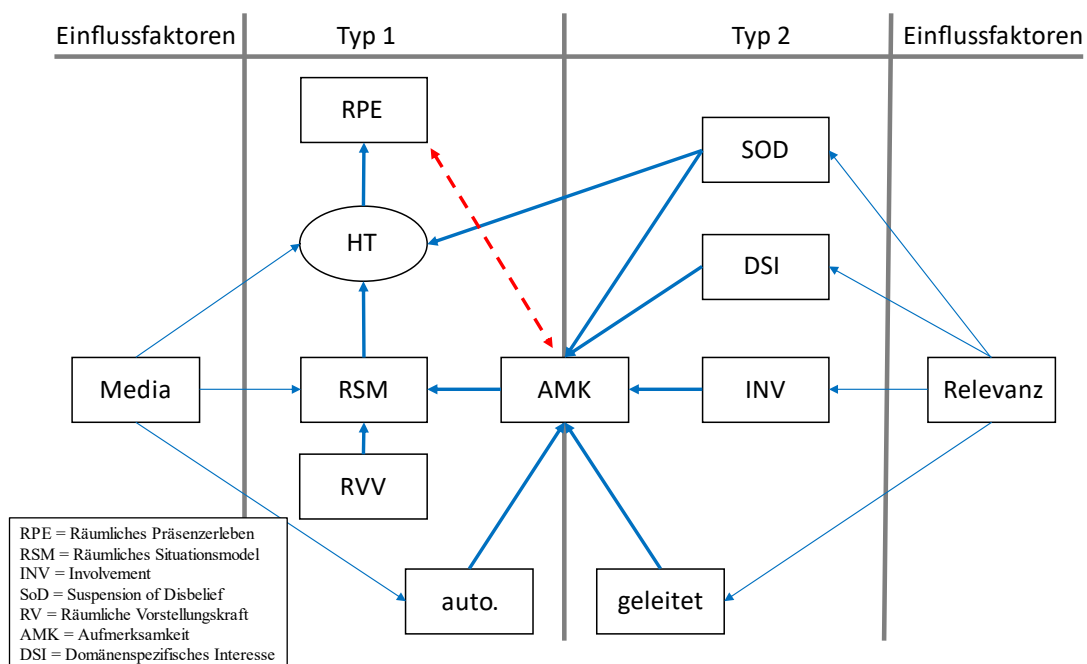


beeinflusst werden. Je relevanter das Produkt oder deren Inhalte für die Teilnehmenden sind, desto eher blenden sie aktiv Störreize durch kontrollierte Aufmerksamkeit aus. Ein Beispiel: Wichtig ist, dass Typ eins und zwei zu jederzeit, in der wir wach auch aktiv sind und alle Reize intern wie extern verarbeiten. Es wird die VR-Brille aufgesetzt und externe Reize der VR-Brille simulieren eine neue Realität. Typ eins bildet nun automatisch anhand dieser Reize das räumliche Situationsmodell und bearbeitet den Hypothesentest, ob die Wahrnehmung der Reize kohärent sowie überzeugend ist und somit als neue Realität angenommen werden kann. Dieses Ergebnis in Form des räumlichen Präsenzerlebens beeinflusst unseren Prozess in Typ zwei (der davor noch mit Informationen aus der Realität gearbeitet hat) und nun evaluiert in welcher Intensität er sich mit den neuen Informationen auseinandersetzt beziehungsweise auseinandersetzen muss. Sind die neuen Reize sehr überzeugend, also erzeugen ein hohes räumliches Präsenzerleben und findet die automatische Aufmerksamkeitslenkung auf die neue Umgebung statt (da es ja ein direkter, unausweichlicher Wechsel zwischen Realität und virtueller Welt ist), setzt sich Typ zwei intensiver mit dieser auseinander und verstärkt durch die kontrollierte Aufmerksamkeit, die auf die neue Umgebung gerichtet wird die Bildung des räumlichen Situationsmodells und damit indirekt das räumliche Präsenzerleben. Kommen nun wie in der VR-Lernumgebung Aufgaben hinzu, die aktiv die Prozesse in Typ zwei ansprechen und in Einklang mit dem Prozess in Typ eins stehen, bildet dies eine Verstärkung der gesamten Aufmerksamkeit auf die virtuelle Umgebung sowohl kontrolliert als auch automatisch. Es wäre daraus abgeleitet, logisch anzunehmen, dass das räumliche Präsenzerleben mit der Aufmerksamkeit in Wechselwirkung steht. Je mehr Aufmerksamkeit automatisch und kontrolliert der Umgebung zukommt, desto stärker verarbeiten sowohl Typ eins als auch Typ zwei die Reize neuen Realität und desto größer kann das Präsenzerleben sein. Je größer das Präsenzerleben ist, desto mehr gelenkte Aufmerksamkeit wird der neuen Realität geschenkt.

Dieser Prozess hat bei der Bearbeitung einer Lernaufgabe sehr wahrscheinlich direkten Einfluss darauf ob und wie in der VR-Lernumgebung Kompetenzen erworben werden können. Auf Basis dieser theoretischen Annahmen wird eine Respezifikation des Prozessmodells vorgenommen. Es postuliert einen theoriebasierten, verbesserten Modellfit für moderne VR-Brillen und der Bearbeitung einer VR-Lernumgebung mit Lernstationen in dem Typ zwei gesteuerte Prozesse wie das Involvement Einfluss auf die Aufmerksamkeit nehmen. Nachfolgend werden die Berechnungen von Pfadanalysen der Lernstationen eins bis drei berichtet, in denen der kausale Wirkpfad des kognitiven Involvements nicht auf das räumliche Präsenzerleben, sondern auf die Aufmerksamkeit zeigt. Es folgt der Hypothese, dass kognitives Involvement von der individuellen Wahrnehmung der persönlichen Relevanz der Lernumgebung beeinflusst wird und sich direkt auf die Aufmerksamkeit auswirkt, welche wiederum das räumliche Situationsmodell beeinflusst, das den Hypothesentest maßgeblich dominiert (siehe Abbildung 69). Da die Variable der persönlichen Relevanz erst in der Diskussion der Ergebnisse hinzugefügt wurde und somit keine Daten vorliegen, kann sie kein Teil des Neuberechneten Modells sein und beschränkt sich nur auf hypothetischen Einfluss. Für vertiefende Analysen wäre die Unterscheidung in kontrollierte und automatische Aufmerksamkeit an dieser Stelle wünschenswert, da theoriebasiert die kontrollierte primär von Typ zwei und die automatische von Typ eins beeinflusst wird. Dies kann allerdings nicht vorgenommen werden, da die genutzte Skala diese Unterscheidung nicht vornimmt. Die mögliche wechselseitige Wirkung von Aufmerksamkeit und räumlichem Präsenzerleben müsste in einem rekursiven Modell berechnet werden. Die theoretischen

Annahmen für diese Verbindung sind in dieser Ausführung noch zu vage und unbelegt, um den Aufwand dieser sehr komplexen statistischen Berechnung zu rechtfertigen. Alle anderen Änderungen werden in das neue, nicht rekursive Modell einbezogen.

Abbildung 69 zeigt die konzeptionelle Darstellung der theoretischen Umstrukturierung des Prozessmodells. Es ist aufgeteilt in Typ eins und zwei, sowie die Einflussfaktoren der persönlichen Relevanz rechts und den Medienfaktoren links davon. Das Involvement beeinflusst nun direkt die Aufmerksamkeit, welche als Vermittler zwischen Typ eins und zwei fungiert und in automatisch und geleitet aufgeteilt ist. Diese wird nun auch von der Suspension of Disbelief beeinflusst. Die angedachte Wechselwirkung zwischen dem räumlichen Präsenzerleben und der Aufmerksamkeit ist mit rot eingezeichnet.



**Abbildung 69: Konzeptionelle Darstellung der Respezifikation des Prozessmodells mit Wirkpfaden (blau) und möglicher Wechselwirkung (rot).**

Abbildung 70 zeigt die errechnete Pfadanalyse der ersten Lernstation mit dem neuen Modell mit den erreichten Modellfit-Werten (Tabelle 29).

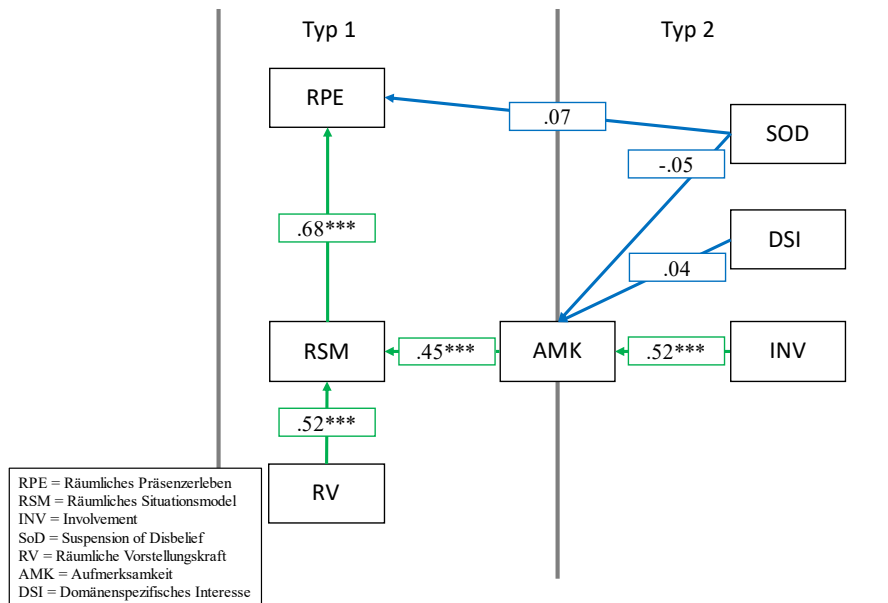


Abbildung 70: Pfadanalyse des respezifizierten Modells in MZ vier.

Tabelle 29: Modellfit-Werte des respezifizierten Modells in MZ vier. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten.

TLI	CFI	RMSEA	SRMR	Chi-Quadrat
(>.9)	(>.95)	(<.08)	(<.08)	(>.05)
.968	.983	.061	.051	$p = .303$

Die Modellfit-Werte weisen nahezu ideale Werte auf. Die Daten passen sehr gut zum Modell. Das Involvement hat, wie in der Herleitung ausgeführt, einen signifikanten Einfluss auf die Aufmerksamkeit ( $\beta = .52$ , CI [0.28, 0.76],  $p < .001$ ). Die Aufmerksamkeit beeinflusst das räumliche Situationsmodell signifikant ( $\beta = .45$ , CI [0.31, 0.71],  $p < .001$ ). Auch die räumliche Vorstellungskraft hat einen signifikanten Effekt auf das räumliche Situationsmodell ( $\beta = .52$ , CI [0.31, 0.64],  $p < .001$ ). Das räumliche Situationsmodell selbst wiederum wirkt sich signifikant auf das räumliche Präsenzerleben aus ( $\beta = .68$ , CI [0.41, 0.81],  $p < .001$ ). Das domänenspezifische Interesse und die Suspension of Disbelief haben keinen messbaren Einfluss. Dies zeigt erneut die klare Dominanz der Präsenzbildung in Typ eins und stärkt die Argumentation, dass Involvement Einfluss auf die Aufmerksamkeit ausübt.

Abbildung 71 zeigt die errechnete Pfadanalyse der ersten Lernstation mit dem neuen Modell mit den erreichten Modellfit-Werten (Tabelle 30).

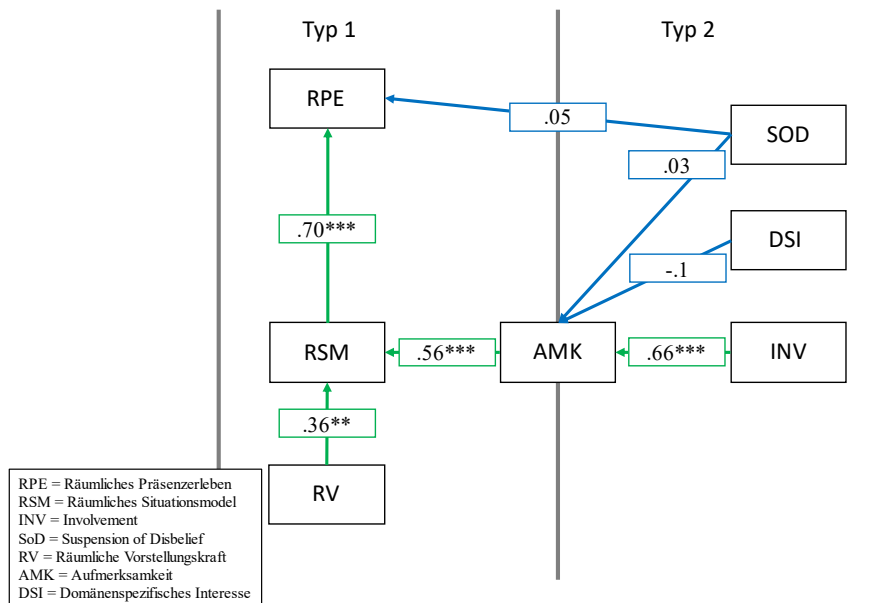


Abbildung 71: Pfadanalyse des respezifizierten Modells in MZ fünf.

Tabelle 30: Modellfit-Werte des respezifizierten Modells in MZ fünf. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten.

TLI	CFI	RMSEA	SRMR	Chi-Quadrat
(>.9)	(>.95)	(<.08)	(<.08)	(>.05)
.887	.94	.123	.064	$p = .084$

Die Modellfit-Werte weisen nahezu ideale Werte auf. Die Daten passen sehr gut zum Modell. Das Involvement hat auch in dieser Station einen signifikanten Einfluss auf die Aufmerksamkeit ( $\beta = .66$ , CI [0.42, 0.93],  $p < .001$ ). Wie in Station eins weisen die Aufmerksamkeit ( $\beta = .56$ , CI [0.30, 0.66],  $p < .001$ ) und das räumliche Vorstellungsvermögen ( $\beta = .36$ , CI [0.11, 0.40],  $p = .002$ ) einen signifikanten Effekt zum räumlichen Situationsmodell auf. Das räumliche Situationsmodell beeinflusst das Präsenzerleben ebenfalls wieder signifikant ( $\beta = .70$ , CI [0.68, 1.15],  $p < .001$ ). Diese Modell und Modellfit-Werte stützen ebenfalls die theoretischen Ausführungen für eine mögliche Respezifikation des Modells beim Einsatz von modernen VR-Brillen und VR-Lernumgebungen.

Abbildung 72 zeigt die errechnete Pfadanalyse der ersten Lernstation mit dem neuen Modell mit den erreichten Modellfit-Werten (Tabelle 31).

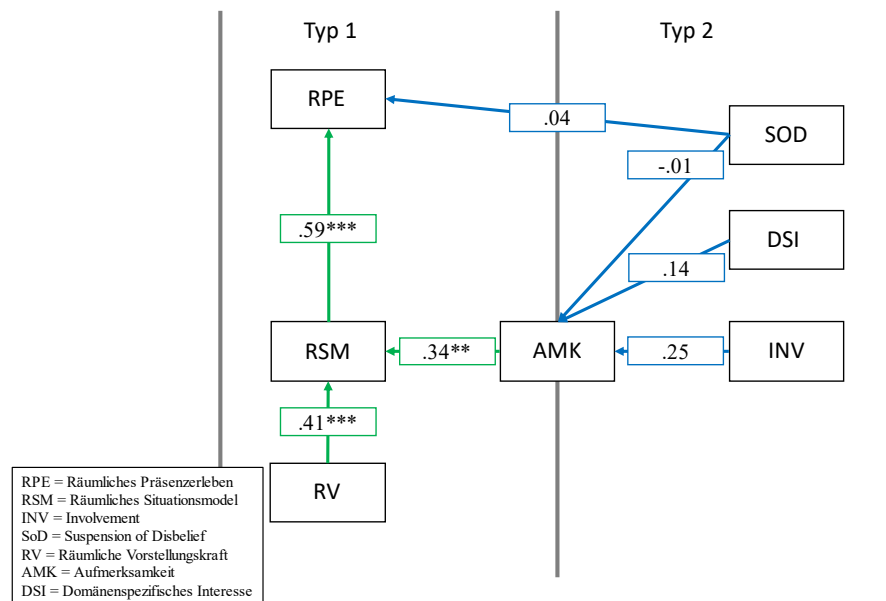


Abbildung 72: Pfadanalyse des respezifizierten Modells in MZ sechs.

Tabelle 31: Modellfit-Werte des respezifizierten Modells in MZ sechs. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten.

TLI	CFI	RMSEA	SRMR	Chi-Quadrat
(>.9)	(>.95)	(<.08)	(<.08)	(>.05)
.566	.769	.179	.091	$p = .008$

Die Modellfit-Werte weichen im Gesamten stark von den idealen Werten ab. Die Daten passen nicht gut zum Modell. Es scheint in dieser Station Strukturen in den Daten zu geben, die das Modell noch nicht erfasst. Die Aufmerksamkeit hat einen signifikanten Effekt ( $\beta = .34$ , CI [0.07, 0.53],  $p = .008$ ) auf das räumliche Situationsmodell, ebenso wie das räumliche Vorstellungsvermögen ( $\beta = .41$ , CI [0.13, 0.43],  $p = .001$ ). Das räumliche Situationsmodell beeinflusst das Präsenzerleben mit ( $\beta = .59$ , CI [0.41, 1.03],  $p < .001$ ) signifikant. Eine Möglichkeit, warum die Modellfit-Werte nicht gut passen, ist, dass die Stichprobe nicht groß genug war, um den Effekt zu entdecken. Eine weitere ist, dass die Interaktionen und Aufgaben zu einfach waren und keine intensive kognitive Auseinandersetzung benötigten, wie beispielsweise die Variablenkontrollstrategie in Station zwei. Als Erinnerung: In Station drei musste ein Baumhologramm auf Altersstufen eingestellt werden, um dann die Masse mit Pins in einem Diagramm anzuzeigen, woraufhin ein Videoclip zu aktueller umweltwissenschaftlicher Forschung eingeblendet wurde. Möglich wäre auch, dass das eingeblendete Video die Aufmerksamkeit von der virtuellen Umgebung ablenkte, diese in den Hintergrund rückte und somit den Einfluss des Involvements auf die Aufmerksamkeit schmälerte. Da die Subskala Involvement verallgemeinert gesagt danach fragt, ob die Gedanken der Person auf das Medium VR gerichtet waren, könnte eine Ablenkung dieser Fokussierung auf ein neues Medium, das innerhalb der VR eingesetzt wird (das Video) so einen Effekt möglich machen. Hierzu wären vertiefende Forschungsansätze

wünschenswert die sich damit beschäftigen, wie sich der Einsatz von Medien und Darstellungsformaten im Kontinuum einer VR-Lernumgebung auf die Wahrnehmung, Aufmerksamkeit, Involvement und den damit verbundenen Cognitive Load auswirken und inwiefern sie als Lerngegenstände in VR geeignet sind. Dies kann direkt mit dem CAMIL-Framework und den darin assoziierten Variablen verknüpft werden (Makransky & Petersen, 2021).

Die Neuberechneten Pfadanalysen zeigen, dass zwei von drei Stationen nahezu perfekte Werte aufweisen. Die Werte der dritten Station passen nur schlecht zum Modell. Vor dem Hintergrund der kleineren Stichprobengröße ( $n = 49$ ) kann es durchaus möglich sein, dass Effekte, die in Station eins und zwei gefunden wurden, in Station drei nicht auftreten und die Datenstruktur deshalb unpassend ist. Die theoretische Respezifikation des Modells mit idealen Cut-Off Werten bei zwei von drei Stationen wird als unterstützender Indikator angesehen, dass die Entstehung von räumlichem Präsenzerleben bei modernen VR-Brillen mit leistungsstarker Software sowie einer kognitiv fordernden VR-Lernumgebung tiefgreifender erforscht werden sollte. Aspekte aus der Bildungsforschung, wie etwa die Relevanz von Lernstoff, motivationale Faktoren wie auch die moderne Technik müssen dabei berücksichtigt werden, um herauszufinden wie räumliches Präsenzerleben entsteht und den Lernprozess in VR beeinflusst. Aus diesen Annahmen und Berechnungen lassen sich keine Gestaltungsprinzipien ableiten. Es ist eine Neubetrachtung des Prozessmodells und fordert dazu auf weitere Forschungsbestreben und -theorien darauf aufzubauen.

## 7 Limitationen und Methodenkritik

Der Erhebungsablauf wies einige ungeplante Begebenheiten auf, die es zu adressieren gilt. Die Raumfindung gestaltete sich um einiges komplizierter als ursprünglich angenommen. Zunächst wurde in einem Pausenraum erhoben, in dem zwei Teilnehmende mit jeweils 2x2 Meter Platz fanden. Der Raum musste im zweiten Zyklus gewechselt werden, da die Ansprüche für 4x4 und 6x6 Meter dort nicht erfüllt wurden. Gewählt wurde zunächst die auf dem Schulgelände verortete Sporthalle. Für den zweiten Zyklus war dies ausreichend, stellte sich aber für die weiteren Zyklen als unpassend heraus, da die Halle während der Erhebungstage (die während der Schulzeit stattfanden), für die Sportstunden gebraucht wurde. Daraufhin wurde die Aula in Betracht gezogen, welche aber nach Rücksprache mit der Verwaltung ausschied, da diese für diverse Theaterstücke und Bandproben gebraucht wurde. Der Umbau der Aula für die Platzbedürfnisse der Erhebung und der Rückbau für die Schulevents war allerdings nicht verhältnismäßig. Deshalb wurde der Aula Vorraum gewählt. Dieser wies ausreichend Platz auf, wurde während den Erhebungszeiten nicht genutzt und musste nicht aufwändig umgebaut werden. Ein Nachteil, den dieser Ort aufwies, waren die gelegentlichen Übungen der Bands in der Aula. In Mikrozyklus drei, welcher die realitätsnahen Umgebungsgeräusche untersuchte, kam es vor, dass die Schul-Big-Band während der Schul- und Erhebungszeit anfang zu proben. Dies hat ein gewisses Zeitfenster benötigt, in der die Erhebung bis zum Ende der Bandprobe ausgesetzt wurde, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen. Ein weiterer Nachteil, den dieser Ort aufwies, war, dass die Teilnehmenden aus den anliegenden Schulgebäuden in Zweiergruppen aus dem Unterricht hinaus durch das Schulgebäude, über den Schulhof durch die Aula bis in den Vorraum gelangen mussten. Dies war ein Zeitaufwand von circa zehn Minuten von Hin- und Rückweg inklusive anschließendem Entsenden der nächsten Gruppe. Dieser Ablauf kostete Zeit, die zusätzlich benötigt wurde.

Die Erhebung besaß durch das Forschungsformat DBR einen sehr hohen Zeitaufwand. Die Programmierung der VR-Lernumgebung umfasste einen Gesamtaufwand, der sehr ambitioniert war. Sowohl die Vorbereitung der Umgebung für die Inhalte der Mikrozyklen als auch die Behebung von Fehlern und Überarbeitungen in eigener Testung brauchte sehr viel Zeit. Diese Zeit hätte durch die Arbeit in einem größeren Team um ein Vielfaches verringert werden können. Durch den Mangel an Finanzierungsmöglichkeiten von fähigen IT-Fachkräften konnte dies jedoch nicht bewerkstelligt werden, weshalb die Programmierungsarbeit in der Unreal Engine in einem Team von zwei Leuten (Autor dieser Dissertation und einer sehr kompetenten Hilfskraft) vorgenommen wurde. In einem größeren Team und mit mehr Hardwareressourcen (VR-Brillen & Laptops) hätten viele Facetten der Umgebung besser sowie schneller optimiert und mit mehr Teilnehmenden erhoben werden können.

Die genutzten Skalen waren für die Erhebung im Allgemeinen ausreichend differenziert, sodass Boden- und Deckeneffekte verhindert werden konnten. Höchstwerte der Skalen konnten anhand der zugrunde liegenden Theorien gut erklärt werden. Während der Erhebung wurde jedoch festgestellt, dass für einzelne Komponenten, wie etwa den Umgebungsgeräuschen, weitere Skalen beziehungsweise weitere differenziertere Mikrozyklen nötig gewesen wären, um die Effekte isolierter zu betrachten. Bei Mikrozyklus zwei, der sich mit dem Bewegungsradius beschäftigte, wäre insgesamt eine größere Stichprobe wünschenswerter gewesen, was jedoch aus verschiedenen Aspekten nicht möglich war. Es hätte beispielsweise die Integration einer weiteren Schule in die Studie erfordert, was wiederum weitere zeitliche sowie konzeptionelle Ressourcen



benötigt hätte, die nicht zur Verfügung standen.

Während der Erhebung der Lernstationen kam es vereinzelt dazu, dass die VR-Lernumgebung eine Fehlfunktion aufwies, die einen Neustart der Umgebung erforderte. Dies kann das räumliche Präsenzerleben negativ beeinflusst haben. Andere Einflüsse, wie etwa das Läuten der Schulglocke oder Lärm auf dem Schulhof oder den Schulgängen hingegen könnten sich zwar negativ ausgewirkt haben, entsprechen aber dem realen Einsatzgebiet und sind damit nicht als Fehlerquellen anzusehen.

Eine weitere Limitation dieser Studie ist, dass die Inhalte der Lernstationen nicht evaluiert wurden. Die Wirksamkeit der einzelnen Komponenten der Lernstationen sind konzeptionell und es ist nicht evaluiert, ob diese dem Lernprozess dienlich sind. Dementsprechend gibt es auch keine gesicherten Ergebnisse dazu, wie und ob mit den Lernstationen gelernt wird. Dies erfordert weitere Zyklen, die das Zusammenspiel aus Interaktionen, Inhalten und Präsenzfaktoren untersuchen sowie in einem anschließenden Kontrollgruppendesign die Wirksamkeit gegenüber herkömmlichem Unterricht untersuchen. Da DBR-Projekte endlos fortgesetzt werden können, wurde sich in dieser Studie dazu entschieden, nach der Evaluation des Präsenzerlebens in den Lernstationen das Projekt zu beenden. Nach Zyklus sechs sind die Faktoren, die aktiv auf das Präsenzerleben wirken, evaluiert und es kann inhaltlich ein neues Kapitel für fortschreitende Forschung eröffnet werden, welches den Schwerpunkt auf den Lernprozess und die dafür erforderlichen Interaktionen legt.

Bei der Errechnung der Pfadanalysen besteht aufgrund der Stichprobengröße eine Limitation der Generalisierbarkeit der Ergebnisse. Wie in Kapitel 4.2 ausgeführt, können in kleinen Stichproben Effekte, die in größeren Populationen oder der Gesamtpopulation vorkommen, möglicherweise nicht auftreten. So kann es sein, dass Effekte entweder nicht gefunden werden oder es noch zusätzliche Strukturen geben kann, die vom Modell noch nicht erfasst sind. Ebenso wurden bei den Pfadanalysen der Mikrozyklen eins bis sechs keine nachträglichen Änderungen durch Anpassung des Modells anhand der Fitindizes für einen optimierten Fit durchgeführt. In der Praxis wird ein schlecht passendes Modell häufig auf die vorhandene Datenstruktur angepasst und im Nachgang argumentiert, wie die Änderung in die theoretische Rahmung passt (Kaplan, 2001). Die Respezifikation des Modells wurde nach der Erhebung und Analyse der empirischen Ergebnisse theoretisch begründet und dann anhand der Daten der Lernstationen getestet. Um Modelle inhaltlich weiterzuentwickeln, bedarf es Fitindizes, die nicht genaue oder unzulässige Werte liefern, die der Theorie entgegenstehen, um dann empirisch und theoretisch geleitete Veränderungen vorzunehmen (ebd.).

Der Einsatz der qualitativen Fragenformate muss in zukünftigen Erhebungen desselben Formats überdacht werden. Es wurden in den Zyklen zwei bis sechs sehr wenige Rückmeldungen gegeben. Das kann einerseits daran liegen, dass die Teilnehmenden nur wenig zu kritisieren oder andererseits vielleicht keine Lust hatten diese auszufüllen. Die Fragebögen wurden im Aula-Vorraum im Stehen an einem Tablet mit Tastatur ausgefüllt. Die qualitativen Fragen befanden sich am Ende des Fragebogens. Möglich ist, dass die Teilnehmenden nach dem Erlebnis in der VR und dem Ausfüllen der Skalen keine Lust mehr hatten zusätzlich noch Freitextfragen zu beantworten. Für detailliertere Rückmeldungen wären beispielsweise Interviews generell gewinnbringender. Diese haben aber auch den Nachteil eines immensen Mehraufwands bei der Auswertung, der noch zusätzlich bewältigt werden müsste.

## 8 Ergebnisdarstellung und Ausblick

Virtual Reality ist ein stetig wachsendes Forschungsgebiet, das vielversprechende Möglichkeiten für den Bildungsbereich durch immersive Lernumgebungen bietet (Chavez & Bayona, 2018; Hassan & Hossain, 2022; Makransky & Petersen, 2021). Trotz nachgewiesener positiver Effekte auf das Lernen (Chavez & Bayona, 2018), fehlen in der Bildung noch an Schulbedürfnisse angepasste Gestaltungsprinzipien für VR-Umgebungen (Johnson-Glenberg, 2018). Es wurden aus der interdisziplinären Theorie rund um immersives Lernen Kriterien abgeleitet und mit Gestaltungskomponenten verbunden.

Auf deren Basis wurde mit einem Design-Based Research Ansatz in Mikrozyklen verschiedene Aspekte von VR-Lernumgebungen untersucht und daraus Gestaltungsprinzipien abgeleitet. Die erstellten Lernstationen, fächerübergreifend für Chemie und Erdkunde konzipiert, wurden praxisnah in vier zehnten Klassen eines Gymnasiums in Rheinland-Pfalz getestet. Der Lerninhalt war der Kohlenstoffkreislauf, thematisch verankert in den jeweiligen Curricula und visualisiert in einer VR-Nachbildung des Lernorts „Reallabor Queichland“.

In den Mikrozyklen wurden unterschiedliche Aspekte wie Realismus der Umgebung, Bewegungsradius, Hintergrundgeräusche und Interaktionsmöglichkeiten evaluiert. Die erhobenen Daten wurden mit verschiedenen Analysemethoden ausgewertet. Die Ergebnisse zeigten eine hohe räumliche Präsenz und wahrgenommenen Realismus. Zudem wurden die wahrgenommene Lerneffektivität, Bedienbarkeit und der Zusammenhang von 3-D-Modellen und deren Manipulierbarkeit in VR als sehr hoch bewertet. Die Pfadanalysen haben eine vertiefende Analyse der Einflüsse der einzelnen Variablen im Prozessmodell des räumlichen Präsenzerlebens zugelassen.

Aus den gesammelten Erkenntnissen wurden zwölf Gestaltungsprinzipien abgeleitet, die als Leitlinien für zukünftige VR-Lernumgebungen im Schulunterricht dienen können. Die Arbeit hat auch Annahmen zur Anpassung des Prozessmodells des räumlichen Präsenzerlebens an moderne VR-Technologien und kognitive Anforderungen von VR-Lernumgebungen geprüft und weitere Forschungsansätze aufgezeigt. Weitere Studien mit größeren Stichproben sind jedoch notwendig, um diese Annahmen zu überprüfen.

Es werden nun alle Ergebnisse dieser Arbeit nach Forschungsfrage sortiert und zusammenfassend dargestellt.

### **(1) Welche allgemeinen Kriterien zur Gestaltung einer Virtual-Reality-Lernumgebung lassen sich aus der Literatur ableiten?**

Allgemeine Hinweise zur Evaluation von VR-Lernumgebungen (Johnson-Glenberg, 2019):

1. Erleichtern Sie die kognitive Anstrengung
2. Verwenden Sie geführte Erkundung
3. Geben Sie sofortiges, umsetzbares Feedback.
4. Testen Sie häufig mit der richtigen Gruppe.
5. Bauen Sie Gelegenheit zur Reflexion ein.
6. Verwenden Sie die Handsteuerung für aktives, körperbasiertes Lernen.

Relevante Prinzipien des Konstruktivismus (Woolfolk, 2014):

7. Lerninhalte sollen in komplexe, relevante und realitätsnahe Lernsituationen eingebettet sein.
8. Lerninhalte und Hilfsmaterialien sollen situations- und bedarfsgerecht bereitgestellt werden.
9. Lerninhalte sollen vielfältig und in unterschiedlichen Darstellungsformen dargestellt werden.
10. Soziale Interaktionen zur Ver- bzw. Bearbeitung der Lerninhalte sollen ermöglicht werden.

Aus der interdisziplinären Theorie konnten folgende Prinzipien zu Lernen in VR und den zusammenhängenden Variablen extrahiert werden:

11. Räumliches Präsenzerleben spielt eine zentrale Rolle beim Lernen in VR und gilt als entscheidender Faktor (Hofer, 2013). Es sollte maximiert werden, um die positiven Effekte auf das Lernen bereitstellen zu können.
12. Der kognitive Prozess, der räumliches Präsenzerleben ermöglicht, kann stark von Immersion und der dazugehörigen Hard- und Software beeinflusst werden (Cummings & Bailenson, 2016). State of the Art Technology sollte zur Programmierung und Durchführung genutzt werden, um die bestmöglichen immersiven Reize zu produzieren.
13. Lernen in VR, sogenanntes Immersive Learning, wird maßgeblich von Immersion, Präsenz, Motivation sowie kognitiven und emotionalen Faktoren beeinflusst (Dengel & Mägdefrau, 2018; Makransky & Petersen, 2021). Bei der Entwicklung von Lernstationen sollte darauf geachtet werden, dass für den bereitgestellten Lernstoff die Vorteile von VR genutzt und die Teilnehmenden motiviert werden können. Die kognitiven Hürden zur Bewältigung der Lernaufgaben in VR müssen angemessen sein.
14. Lernen in VR wird von Embodiment beeinflusst und es gibt noch keine Designrichtlinien dafür (Johnson-Glenberg, 2018). Wenn Verkörperung genutzt wird, sollte auf eine angemessene Umsetzung geachtet werden, um keine negativen Einflüsse auf das Präsenzerleben auszulösen.
15. Annahmen und Erwartungen der Zielgruppe an die Umgebung sollten bei der Umsetzung einbezogen werden, um Realismus und damit zusammenhängende Authentizität zu fördern (Gilbert, 2016).
16. Motion Sickness muss vermieden werden (Chattha et al., 2020).
17. Auditive Reize sollten durch Soundscapes integriert werden und können das individuelle Erleben der Landschaft beeinflussen (Edler et al., 2019).
18. Informationen der eigenen Bewegung und der Umwelt sind notwendig, um Selbstlokation zu fördern (Barry & Burgess, 2014; Nardini et al., 2008). Es sollte ausreichend Bewegungsfreiheit vorhanden sein, um das Bewegungspotential zur Sammlung solcher Informationen zu ermöglichen.

**(2) Welche konkreten Gestaltungsprinzipien lassen sich nach der Evaluation der kriteriengeleiteten VR-Lernumgebung formulieren?**

1. Je realistischer und authentischer eine VR-Lernumgebung und ihre Aufgaben sind, desto höher ist das mögliche Involvement der Nutzenden.

2. Aufgrund der mittleren Korrelation von Involvement und räumlichem Präsenzerleben, aber dem fehlenden Einfluss des Involvements auf die Ausbildung der desselben in realistischen VR-Lernumgebungen, sollten räumliches Präsenzerleben und Involvement getrennt, aber aufeinander abgestimmt geplant werden.
3. Das räumliche Situationsmodell kann durch modernste Hard- und Software so gestärkt werden, dass es das räumliche Präsenzerleben in sehr hohem Maße beeinflusst.
4. Größere Bewegungsradien sollten tendenziell bevorzugt werden, um das Erlebnis der räumlichen Präsenz zu verbessern, aber die Designenden sollten immer die räumlichen Beschränkungen des Aufstellungsortes berücksichtigen.
5. Ein erhöhter Bewegungsradius sowie die Ergänzung von ortsbezogenen, realitätsnahen Geräuschen erhöhen die Selbstlokation und damit das räumliche Präsenzerleben.
6. Realitätsnahe Umweltfaktoren wie Proportionen und Distanzen wirken sich positiv auf das räumliche Präsenzerleben aus und sollten bei der Gestaltung der 3-D-Assets und der virtuellen Welt berücksichtigt werden.
7. Realistische Interaktionen und realitätsnahe Naturgesetze für die zu nutzenden Gegenstände steigern das räumliche Präsenzerleben.
8. Bei der Wahl der Interaktionsmöglichkeiten in VR-Lernumgebungen können realitätsferne und realitätsnahe Aktionen einzeln oder kombiniert gewählt werden, ohne einen negativen Effekt auf das räumliche Präsenzerleben auszuüben. Es sollte jedoch stets beachtet werden, dass die Interaktionen und Angebote optisch als auch inhaltlich kohärent in die Umgebung eingefügt werden, um die Authentizität nicht zu gefährden.
9. Um die automatische und kontrollierte Aufmerksamkeit der Nutzenden in einem hohen Maß auf die VR-Lernumgebung zu lenken, sollten Bewegungsmöglichkeiten, auditive und visuelle Reize als auch Handlungsmöglichkeiten kombiniert werden.
10. Um realistische VR-Lernumgebungen zu planen und zu gestalten, sollten die visuellen, auditiven und kinästhetischen Sinne an die realistische Umgebung angepasst werden.
11. Die mehrfache Nutzung einer VR-Lernumgebung sollte bei der Planung berücksichtigt werden, da dies das Interesse der Teilnehmenden steigern und die Misserfolgsbefürchtung senken kann.
12. In VR-Lernumgebungen mit Bewegungsradien von 4x4 Metern oder weniger, sollte nach Möglichkeit auf die Verwendung eines Verbindungskabels von der VR-Brille zu beispielsweise einem Endgerät oder einer Steckdose verzichtet werden.

Die vorgestellten Ergebnisse bieten viele Ansatzpunkte für die weitere Erforschungen von virtuellen Lernumgebungen für die Schulpraxis. Es hat sich gezeigt, dass die Forschungsmethode der designbasierten Forschung geeignet ist, um komplexe Lernumgebungen zu konzipieren und zu evaluieren. Der Ansatz ist eng mit der Praxis verknüpft und ermöglicht so einen Transfer des Endprodukts aus der Forschung in die Unterrichtspraxis. Denkbar ist, dass in Zukunft weitere Studien mit der hier vorgestellten Lernumgebung durchgeführt werden.

Durch das Release der neusten Unreal Engine (Version 5.0) ist das technische Niveau um ein Vielfaches gestiegen und bietet neue Systeme, die den Realismus von digitalen Umgebungen im Bereich VR verbessern. Die VR-Lernumgebung sollte somit vor der nächsten Erhebung an die neusten Systeme angepasst werden, um zeitgemäße Daten zu generieren.

Die Inhalte der Lernstationen sind noch nicht auf die Bearbeitung durch Lernende und den daraus resultierenden Lernerfolg evaluiert. In vergleichenden Studien zwischen der konzipierten VR-Lernumgebung und dem konventionellen Unterricht mit identischen Inhalten kann untersucht werden, ob es Unterschiede beim Erwerb von Fachwissen gibt.

Die Lernmaterialien, die in dieser Arbeit konzipiert wurden, sollten auf die im CAMIL-Framework (Makransky & Petersen, 2021) besprochenen, aber in dieser Arbeit nicht untersuchten Faktoren der kognitiven Belastung, Selbstregulation und Selbstwirksamkeit untersucht werden. Hierzu sollten Forschungsansätze verfolgt werden, die sich damit beschäftigen, wie sich der Einsatz von Medien und Darstellungsformaten in einer VR-Lernumgebung auf die mit dem Lernprozess assoziierten Variablen auswirken und inwiefern sie überhaupt als Lerngegenstände in VR geeignet sind. Prinzipiell sollte dies als Grundlagenforschung für Lernen in VR angesehen werden, da ohne geeignetes Lernmaterial Lernen (ungeachtet des Mediums) generell nur erschwert möglich ist (Huebener et al., 2020). Jede noch so kohärente Umgebung, die gutes Präsenzerleben erzeugt, vermag zwar damit eine gute Voraussetzung für Lernen in VR zu ermöglichen, aber wenn die Lernmaterialien konträr wirken oder falsch implementiert werden, kann das den Lernerfolg schmälern (Kirschner et al., 2006).

Ein weiterer möglicher Forschungsansatz, der sich aus den Ergebnissen dieser Arbeit ableitet, ist, dass einzelne Aspekte des räumlichen Präsenzerlebens in VR-Lernumgebungen vertiefend und isolierter untersucht werden. Einer dieser Aspekte ist der Einfluss von Hintergrundgeräuschen. Breuer et al. (2022) zeigen auf, dass akustische Hintergrundgeräusche einen Effekt auf den auditiven Aufmerksamkeitswechsel von Kindern haben. In ihrer Studie wird für weiterführende Studien empfohlen den auditiven und visuellen Realismus zu verbessern sowie ein Schulunterrichtsszenario zu schaffen.

Die Respezifikation des Modells des räumlichen Präsenzerlebens sowie dessen Spezialisierung auf VR-Lernumgebungen durch Variablen des Immersive Learnings bietet ebenfalls viel Potenzial und Möglichkeiten für weitere Forschungsansätze. Die Integration der persönlichen Relevanz des Lernstoffes sowie die Zusammenhänge zu den motivationalen Faktoren und den damit verbundenen Lernfaktoren stellen einen wichtigen Bereich dar, der untersucht werden muss. Diese Verknüpfung kann möglicherweise ein Schlüsselement darstellen, um Lernprozesse in VR besser verstehen und gestalten zu können.

Diese Arbeit bietet nicht nur für Forschende in den Naturwissenschaften und der Naturwissenschaftsdidaktik, sondern auch für die Psychologie, Erziehungswissenschaften und allen angrenzenden Forschungsbereichen viele Ansätze um bestehende Theorien vertiefend zu untersuchen und zu verknüpfen.

Ebenso ist die Untersuchung von weiteren Einsatzformaten und Unterrichtsmethoden möglich, wie beispielsweise als virtuelle Exkursionen. Da die Visualisierung von komplexen und/oder lokal begrenzten Phänomenen im Schulalltag oftmals nicht möglich ist, wären hierfür (reale) Exkursionen notwendig (Löbner, 2011). Diese haben allerdings Hürden, wie die Finanzierung und rechtliche Fragen, die oft nicht bewältigt werden können (ebd.). Im schulischen Kontext wird in der PISA Studie gefordert, diese Kontexte bzw. Alltagssituationen solcher Phänomene zu kennen (Reiss et al., 2016). VR-Lernumgebungen bieten sich an, um nicht durchführbare Exkursionen zu ersetzen.

Im interdisziplinären Kontext von VR-Lernumgebungen wird aufgeworfen, dass Fachdisziplinen mit der Pädagogik und Didaktik zusammenarbeiten sollen, um Lerninhalte zu erstellen (Huang & Roscoe, 2021). Ein Literature Review von Jiang et al. (2022) zeigt, dass in der Medizin, einem etablierten Feld für den Einsatz von VR zu Trainingszwecken, nur 2.6% der Publikationen, die den Einsatz von VR zur Ausbildung von Studierenden thematisieren, einem konzeptuellen Framework folgen oder die Umgebungen theoriegeleitet entwickelt haben. Dies unterstreicht den Bedarf an theoriegeleiteten, empirisch evaluierten Gestaltungsprinzipien, die in dieser Arbeit untersucht wurden und die Notwendigkeit von interdisziplinärer Forschung. Ein vertiefender Blick in die Gestaltung von VR-Lernumgebungen ausgewählter Fachdisziplinen kann ebenfalls dazu beitragen, neue Prinzipien empirisch zu evaluieren und weiterzuentwickeln.

Die Stärke von VR, dass Raum und Zeit manipuliert werden können, sollte in zukünftiger Forschung vertieft untersucht werden. In den Lernstationen dieser Arbeit standen realitätsnahe sowie realitätsferne Interaktionen im Vordergrund und wie diese das räumliche Präsenzerleben beeinflussen. Da kein negativer Effekt festgestellt werden konnte, können nun Gestaltungsprinzipien für die Manipulation der VR-Umgebung in realitätsnahen Settings untersucht werden. Beispielsweise Teleportationen in andere Landschaften oder zu unzugänglichen Prozessen sowie Zeitraffer-Veränderungen der Landschaft, in der sich die Nutzenden befinden, können nun im Fokus der Forschung stehen. VR-Lernumgebungen können dadurch einen erheblichen Einfluss als sogenannte „Game-Changer“ im Bildungsbereich ausüben (Pirker & Dengel, 2021). Diese Arbeit trägt mit den erforschten Gestaltungsprinzipien dazu bei, dass innovative Formate als „Game-Changer“ im Schulunterricht weiter erforscht und eingesetzt werden können.

Der Aufwand, der der Konzeption und Evaluierung einer VR-Lernumgebung gegenübersteht, muss allerdings bei allen anknüpfenden Forschungsvorhaben bedacht werden. Gerade die Programmierfähigkeiten müssen bei der Planung als einer der elementarsten Punkte gelten. Es bedarf einem Zusammenspiel aus IT-, Forschungs- und Praxisvertretern, um ein solches Projekt erfolgreich und in einem angemessenen Zeitrahmen zu bewältigen. Das ermöglicht nicht nur für die Forschung eine neue Sicht- und Arbeitsweise, sondern bietet auch Lernenden und Kooperationspartnern einen Einblick in die Wissenschaft, die hinter den Lernmaterialien und -angeboten steht. Gegenseitige Synergieeffekte können das Endprodukt verbessern und eine breitere gesellschaftliche Akzeptanz für wissenschaftlich evaluierte Neuheiten (wie in diesem Fall VR-Lernumgebungen) im praktischen Schulunterricht bewirken. Diese Arbeit bildet die Grundlage und Multiplikator-Rolle, um die Erforschung, Gestaltung und den Einsatz von VR-Lernumgebungen in Schulen voranzutreiben. Hierfür sollten die in dieser Arbeit generierten Gestaltungsprinzipien genutzt, erneut geprüft und falls notwendig redesignet werden.

## 9 Literaturverzeichnis

- Abril, G., Guérin, F., Richard, S., Delmas, R., Galy-Lacaux, C., Gosse, P., Tremblay, A., Varfalvy, L., Dos Santos, M. A. & Matvienko, B. (2005). Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-year old tropical reservoir (Petit Saut, French Guiana). *Global Biogeochemical Cycles*, 19(4).  
<https://doi.org/10.1029/2005GB002457>
- Anderson, T. & Shattuck, J. (2012). Design-Based Research. *Educational Researcher*, 41(1), 16–25. <https://doi.org/10.3102/0013189X11428813>
- Anderson-Teixeira, K. J., Herrmann, V., Banbury Morgan, R., Bond-Lamberty, B., Cook-Patton, S. C., Ferson, A. E., Muller-Landau, H. C. & Wang, M. M. H. (2021). Carbon cycling in mature and regrowth forests globally. *Environmental Research Letters*, 16(5), 53009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abed01>
- Anderson-Teixeira, K. J., Herrmann, V., Rollinson, C. R., Gonzalez, B., Gonzalez-Akre, E. B., Pederson, N., Alexander, M. R., Allen, C. D., Alfaro-Sánchez, R., Awada, T., Baltzer, J. L., Baker, P. J., Birch, J. D., Bunyavejchewin, S., Cherubini, P., Davies, S. J., Dow, C., Helcoski, R., Kašpar, J., [...] Zuidema, P. A. (2022). Joint effects of climate, tree size, and year on annual tree growth derived from tree-ring records of ten globally distributed forests. *Global change biology*, 28(1), 245–266.  
<https://doi.org/10.1111/gcb.15934>
- Arzheimer, K. (2016). *Strukturgleichungsmodelle: Eine anwendungsorientierte Einführung*. Springer VS, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-09609-0>
- Backhaus, K., Erichson, B., Gensler, S., Weiber, R. & Weiber, T. (2021). Einführung in die empirische Datenanalyse. In K. Backhaus, B. Erichson, S. Gensler, R. Weiber & T. Weiber (Hrsg.), *Multivariate Analysemethoden* (S. 1–60). Springer Fachmedien Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-32425-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-658-32425-4_1)
- Bak, P. M. (2019). *Lernen, Motivation und Emotion: Allgemeine Psychologie II – das Wichtigste, prägnant und anwendungsorientiert*. Springer Berlin, Heidelberg.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59691-3>
- Bakeman, R. (2005). Recommended effect size statistics for repeated measures designs. *Behavior research methods*, 37(3), 379–384. <https://doi.org/10.3758/bf03192707>
- Barry, C. & Burgess, N. (2014). Neural mechanisms of self-location. *Current biology : CB*, 24(8), R330-9. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.02.049>.
- Behe, B. K., Bae, M., Huddleston, P. T. & Sage, L. (2015). The effect of involvement on visual attention and product choice. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 24, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2015.01.002>
- Behera, S. K. (2013). E- and M-Learning: A Comparative Study. *International Journal on New Trends in Education and Their Implications*, 4(3), Artikel 08, 65–78.
- Bell, P. (2004). On the Theoretical Breadth of Design-Based Research in Education. *Educational Psychologist*, 39(4), 243–253. [https://doi.org/10.1207/s15326985ep3904\\_6](https://doi.org/10.1207/s15326985ep3904_6)
- Berning, C. C. (2019). Strukturgleichungsmodelle. In M. Apelt, I. Bode, R. Hasse, U. Meyer, V. V. Groddeck, M. Wilkesmann & A. Windeler (Hrsg.), *Springer Reference Sozialwissenschaften. Handbuch Organisationssoziologie* (S. 1–18). Springer Fachmedien Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-16937-4\\_30-2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-16937-4_30-2)



- Bertrand, P., Guegan, J., Robieux, L., McCall, C. A. & Zenasni, F. (2018). Learning Empathy Through Virtual Reality: Multiple Strategies for Training Empathy-Related Abilities Using Body Ownership Illusions in Embodied Virtual Reality. *Frontiers in robotics and AI*, 5, 26. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00026>
- Biocca, F., Kim, J. & Choi, Y. (2001). Visual Touch in Virtual Environments: An Exploratory Study of Presence, Multimodal Interfaces, and Cross-Modal Sensory Illusions. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(3), 247–265. <https://doi.org/10.1162/105474601300343595>
- Biocca, F. & Levy, M. R. (1995). *Communication in the Age of Virtual Reality* (1st ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781410603128>
- Blanke, O. (2012). Multisensory brain mechanisms of bodily self-consciousness. *Nature reviews. Neuroscience*, 13(8), 556–571. <https://doi.org/10.1038/nrn3292>
- Bortz, J. & Schuster, C. (2010). Pfadanalyse. In J. Bortz & C. Schuster (Hrsg.), *Springer-Lehrbuch. Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (S. 435–452). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-12770-0\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-642-12770-0_24)
- Bowman, D. A. & McMahan, R. P. (2007). Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough? *Computer*, 40(7), 36–43. <https://doi.org/10.1109/MC.2007.257>
- Brandenburger, M., Salim, C. A., Schwichow, M., Wilbers, J. & Mikelskis-Seifert, S. (2022). Modellierung der Struktur der Variablenkontrollstrategie und Abbildung von Veränderungen in der Grundschule. *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften*, 28(1). <https://doi.org/10.1007/s40573-022-00140-x>
- Breuer, C., Loh, K., Leist, L., Fremerey, S., Raake, A., Klatte, M. & Fels, J. (2022). Examining the Auditory Selective Attention Switch in a Child-Suited Virtual Reality Classroom Environment. *International journal of environmental research and public health*, 19(24), Artikel 16569. <https://doi.org/10.3390/ijerph192416569>
- Broaders, S. C., Cook, S. W., Mitchell, Z. & Goldin-Meadow, S. (2007). Making children gesture brings out implicit knowledge and leads to learning. *Journal of experimental psychology. General*, 136(4), 539–550. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.136.4.539>
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.). (2023). *Was ist der DigitalPakt Schule?* <https://www.digitalpaktschule.de/de/was-ist-der-digitalpakt-schule-1701.html>
- Büngert, S., Eckmann, H., Fardel, B., Gilbert, T., Grafelmann, V., Kaufmann, S., Remus, R., Rodewald, C., Mädlich, J., Kosel, A. & Baader, A. (2016). *Sichere Schule - Sporthalle: Bauliche Anforderungen, Sporteinrichtungen & -geräte*. [https://sish.rms2cdn.de/files/public/gesamt-pdf/sporthalle-bauliches\\_sportgeraete.pdf](https://sish.rms2cdn.de/files/public/gesamt-pdf/sporthalle-bauliches_sportgeraete.pdf)
- Burda-Zoyke (2017). Design-Based Research in der Berufs- und Design-Based Research in der Berufs- und Wirtschaftspädagogik - Rezeption und Umsetzungsvarianten. *bwp@ Berufs- und Wirtschaftspädagogik - online*(33), 1–27. [http://www.bwpat.de/ausgabe33/burda-zoyke\\_bwpat33.pdf](http://www.bwpat.de/ausgabe33/burda-zoyke_bwpat33.pdf)
- Celsi, R. L. & Olson, J. C. (1988). The Role of Involvement in Attention and Comprehension Processes. *Journal of Consumer Research*, 15(2), 210–224.
- Chandramouli, M., Zahraee, M. & Winer, C. (2014). A fun-learning approach to programming: An adaptive Virtual Reality (VR) platform to teach programming to engineering students. In *IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)* (S. 581–586). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EIT.2014.6871829>

- Chattha, U. A., Janjua, U. I., Anwar, F., Madni, T. M., Cheema, M. F. & Janjua, S. I. (2020). Motion Sickness in Virtual Reality: An Empirical Evaluation. *IEEE Access*, 8, 130486–130499. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3007076>
- Chavez, B. & Bayona, S. (2018). Virtual Reality in the Learning Process. In Á. Rocha, H. Adeli, L. P. Reis & S. Costanzo (Hrsg.), *Advances in Intelligent Systems and Computing. Trends and Advances in Information Systems and Technologies* (Bd. 746, S. 1345–1356). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-77712-2\\_129](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77712-2_129)
- Clark, I. D. & Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology* (First edition). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482242911>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Cole, J. J., Bade, D. L., Bastviken, D., Pace, M. L. & van de Bogert, M. (2010). Multiple approaches to estimating air-water gas exchange in small lakes. *Limnology and Oceanography: Methods*, 8(6), 285–293. <https://doi.org/10.4319/lom.2010.8.285>
- Cooke, R. & Sheeran, P. (2004). Moderation of cognition-intention and cognition-behaviour relations: a meta-analysis of properties of variables from the theory of planned behaviour. *The British journal of social psychology*, 43(2), 159–186. <https://doi.org/10.1348/0144666041501688>
- Cummings, J. J. & Bailenson, J. N. (2016). How Immersive Is Enough? A Meta-Analysis of the Effect of Immersive Technology on User Presence. *Media Psychology*, 19(2), 272–309. <https://doi.org/10.1080/15213269.2015.1015740>
- Dengel, A. (2022). What Is Immersive Learning? In *2022 8th International Conference of the Immersive Learning Research Network (iLRN)* (S. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.23919/iLRN55037.2022.9815941>
- Dengel, A. & Mägdefrau, J. (2018). Immersive Learning Explored: Subjective and Objective Factors Influencing Learning Outcomes in Immersive Educational Virtual Environments. In M. J. W. Lee (Hrsg.), *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)* (S. 608–615). IEEE. <https://doi.org/10.1109/TALE.2018.8615281>
- Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina. (2021). *Klimawandel: Ursachen, Folgen und Handlungsmöglichkeiten*. [https://levana.leopoldina.org/receive/leopoldina\\_mods\\_00327](https://levana.leopoldina.org/receive/leopoldina_mods_00327)
- Dilger, B. & Euler, D. (2017). Wissenschaft und Praxis in der gestaltungsorientierten Forschung – ziemlich beste Freunde? In K. Büchter, F. Gramlinger, H.-H. Kremer, N. Naeve-Stoß, K. Wilbers, Windelband & Lars (Hrsg.), *bwp@ Berufs- und Wirtschaftspädagogik – online* (Bd. 33, S. 1–18).
- Döring, N., Bortz, J. & Pöschl, S. (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (5. Aufl.). Springer-Lehrbuch. Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-41089-5>
- Durning, S. J., Dong, T., Artino, A. R., van der Vleuten, C., Holmboe, E. & Schuwirth, L. (2015). Dual processing theory and experts' reasoning: exploring thinking on national multiple-choice questions. *Perspectives on medical education*, 4(4), 168–175. <https://doi.org/10.1007/s40037-015-0196-6>

- Edelson, D. C. (2002). Design Research: What We Learn When We Engage in Design. *Journal of the Learning Sciences*, 11(1), 105–121. [https://doi.org/10.1207/S15327809JLS1101\\_4](https://doi.org/10.1207/S15327809JLS1101_4)
- Edler, D., Kühne, O., Keil, J. & Dickmann, F. (2019). Audiovisual Cartography: Established and New Multimedia Approaches to Represent Soundscapes. *KN - Journal of Cartography and Geographic Information*, 69(1), 5–17. <https://doi.org/10.1007/s42489-019-00004-4>
- Engelkamp, J. & Zimmer, H. D. (1994). Motor similarity in subject-performed tasks. *Psychological research*, 57(1), 47–53. <https://doi.org/10.1007/BF00452995>
- Euler, D. (2014). Design Principles als Kristallisationspunkt für Praxisgestaltung und wissenschaftliche Erkenntnisgewinnung. In D. Euler & P. F. E. Sloane (Hrsg.), *Zeitschrift für Berufs- und Wirtschaftspädagogik Beiheft: Bd. 27. Design-based research* (S. 97–112). Franz Steiner Verlag.
- Evans, J. S. B. T. & Stanovich, K. E. (2013). Dual-Process Theories of Higher Cognition: Advancing the Debate. *Perspectives on psychological science : a journal of the Association for Psychological Science*, 8(3), 223–241. <https://doi.org/10.1177/1745691612460685>
- Flohn, H. (1981). Klimaänderung als Folge der CO<sub>2</sub>-Zunahme? *Physik Journal*, 37(7), 184–190. <https://doi.org/10.1002/phbl.19810370714>
- Forkel, A. (2009). *Entdeckendes Lernen mit Lernspielen im Unterricht der Sekundarstufe I: Konzeptionelle Grundlegung, Entwicklung und Erprobung* [Dissertation]. Universität zu Köln, Köln. <http://kups.ub.uni-koeln.de/id/eprint/2882>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Gregor, L., Hauck, J., Le Quéré, C., Lujckx, I. T., Olsen, A., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Alkama, R., . . . Zheng, B. (2022). Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11), 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
- Gall, D., Roth, D., Stauffert, J.-P., Zarges, J. & Latoschik, M. E. (2021). Embodiment in Virtual Reality Intensifies Emotional Responses to Virtual Stimuli. *Frontiers in psychology*, 12, 674179. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.674179>
- Gilbert, S. B. (2016). Perceived Realism of Virtual Environments Depends on Authenticity. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 25(4), 322–324. [https://doi.org/10.1162/PRES\\_a\\_00276](https://doi.org/10.1162/PRES_a_00276)
- Goff, W. M. & Getenet, S. (2017). Design Based Research in Doctoral Studies: Adding a New Dimension to Doctoral Research. *International Journal of Doctoral Studies*, 12, 107–121. <https://doi.org/10.28945/3761>
- Golding, J. F. (2006). Motion sickness susceptibility. *Autonomic neuroscience : basic & clinical*, 129(1-2), 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.autneu.2006.07.019>
- Golding, J. F. (2016). Motion sickness. *Handbook of clinical neurology*, 137, 371–390. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63437-5.00027-3>
- Goldin-Meadow, S., Nusbaum, H., Kelly, S. D. & Wagner, S. (2001). Explaining math: gesturing lightens the load. *Psychological science*, 12(6), 516–522. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00395>

- Goretzko, D. & Bühner, M. (2022). Robustness of factor solutions in exploratory factor analysis. *Behaviormetrika*, 49(1), 131–148. <https://doi.org/10.1007/s41237-021-00152-w>
- Graaff, E. de (2008). Educational research and design of the virtual learning environment. In L. Malmi & A. Pears (Hrsg.), *Proceedings of the 8th International Conference on Computing Education Research* (S. 1–3). ACM Digital Library. <https://doi.org/10.1145/1595356.1595358>
- Gravetter, F. J. & Wallnau, L. B. (2017). *Statistics for the behavioral sciences* (10. Aufl.). Cengage Learning.
- Gunderson, C. A. & Wullschleger, S. D. (1994). Photosynthetic acclimation in trees to rising atmospheric CO<sub>2</sub>: A broader perspective. *Photosynthesis research*, 39(3), 369–388. <https://doi.org/10.1007/BF00014592>
- Harrison, L., Stephan, K. & Friston, K. (2007). Effective Connectivity. In *Statistical Parametric Mapping* (S. 508–521). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012372560-8/50038-3>
- Hartmann, T., Böcking, S., Schramm, H., Wirth, W., Klimmt, C. & Vorderer, P. (2005). Räumliche Präsenz als Rezeptionsmodalität. Ein theoretisches Modell zur Entstehung von Präsenzerleben. In V. Gehrau, H. Bilandzic & J. Woelke (Hrsg.), *Rezeptionsstrategien und Rezeptionsmodalitäten* (S. 21–37). Fischer.
- Hartmann, T., Wirth, W., Vorderer, P., Klimmt, C., Schramm, H. & Böcking, S. (2015). Spatial Presence Theory: State of the Art and Challenges Ahead. In M. Lombard, F. Biocca, J. Freeman, W. IJsselsteijn & R. J. Schaevitz (Hrsg.), *Immersed in Media: Telepresence Theory, Measurement & Technology* (S. 115–135). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-10190-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-319-10190-3_7)
- Hassan, M. & Hossain, M. A. (2022). A VR based children formula feed preparation training simulator with AI-enabled automated assessment features. In *2022 14th International Conference on Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA)* (S. 303–308). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SKIMA57145.2022.10029659>
- Haukoos, J. S. & Lewis, R. J. (2005). Advanced statistics: bootstrapping confidence intervals for statistics with "difficult" distributions. *Academic emergency medicine*, 12(4), 360–365. <https://doi.org/10.1197/j.aem.2004.11.018>
- Heckhausen, J. & Heckhausen, H. (2006). Motivation und Handeln: Einführung und Überblick. In J. Heckhausen & H. Heckhausen (Hrsg.), *Motivation und Handeln* (S. 1–9). Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/3-540-29975-0\\_1](https://doi.org/10.1007/3-540-29975-0_1)
- Heeter, C. (1992). Being There: The Subjective Experience of Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(2), 262–271. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.2.262>
- Herranz-Pascual, K., Iraurgi, I., Aspuru, I., Garcia-Pérez, I., Eguiguren, J. L. & Santander, Á. (2023). Development of the Acoustic Comfort Assessment Scale (ACAS-12): Psychometric properties, validity evidence and back-translation between Spanish and English. *PloS one*, 18(2), e0281534. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0281534>
- Hofer, M. (2013). Präsenzerleben und Transportation. In W. Schweiger & A. Fahr (Hrsg.), *Handbuch Medienwirkungsforschung* (S. 279–294). Springer VS. [https://doi.org/10.1007/978-3-531-18967-3\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-531-18967-3_14)

- Hofer, M. (2016). *Presence und Involvement* (1. Aufl.). *Konzepte. Ansätze der Medien- und Kommunikationswissenschaft: Bd. 15*. Nomos.
- Hofer, M., Hartmann, T., Eden, A., Ratan, R. & Hahn, L. (2020). The Role of Plausibility in the Experience of Spatial Presence in Virtual Environments. *Frontiers in Virtual Reality, 1*, Artikel 2. <https://doi.org/10.3389/frvir.2020.00002>
- Hofer, M., Wirth, W., Kuehne, R., Schramm, H. & Sacau, A. (2012). Structural Equation Modeling of Spatial Presence: The Influence of Cognitive Processes and Traits. *Media Psychology, 15*(4), 373–395. <https://doi.org/10.1080/15213269.2012.723118>
- Hoffmann, I. (2021). Zum aktuellen Mehrwert der Erstellung und Analyse von Gestikkorpora in der universitären DaF-Lehrkräfteausbildung - methodologische Überlegungen. *KorDaF – Korpora Deutsch als Fremdsprache, 1*(1), 124–139. <https://doi.org/10.26083/tuprints-00019490>
- Huang, W. (2019). Examining the impact of head-mounted display virtual reality on the science self-efficacy of high schoolers. *Interactive Learning Environments, 30*(1), 100–112. <https://doi.org/10.1080/10494820.2019.1641525>
- Huang, W. & Roscoe, R. D. (2021). Head-mounted display-based virtual reality systems in engineering education: A review of recent research. *Computer Applications in Engineering Education, 29*(5), 1420–1435. <https://doi.org/10.1002/cae.22393>
- Huang, W., Roscoe, R. D., Johnson-Glenberg, M. C. & Craig, S. D. (2021). Motivation, engagement, and performance across multiple virtual reality sessions and levels of immersion. *Journal of Computer Assisted Learning, 37*(3), 745–758. <https://doi.org/10.1111/jcal.12520>
- Huebener, M., Spieß, C. K. & Zinn, S. (2020). *SchülerInnen in Corona-Zeiten: Teils deutliche Unterschiede im Zugang zu Lernmaterial nach Schultypen und -trägern*. [https://doi.org/10.18723/diw\\_wb:2020-47-1](https://doi.org/10.18723/diw_wb:2020-47-1)
- Hui-Zhen, R. & Zong-Fa, L. (2014). Application and Prospect of the Virtual Reality Technology in College Ideological Education. In *Intelligent Systems Design and Engineering Applications, 2013 Fourth International Conference on* (S. 125–128). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISDEA.2013.434>
- Hüppauf, B. (2007). Heimat - die Wiederkehr eines verpönten Wortes. Ein Populärmythos im Zeitalter der Globalisierung. In G. Gebhard, O. Geisler & S. Schröter (Hrsg.), *Kultur- und Medientheorie. Heimat: Konturen und Konjunkturen eines umstrittenen Konzepts* (S. 109–140). transcript. <https://doi.org/10.1515/9783839407110-003>
- Jiang, H., Vimalasvaran, S., Wang, J. K., Lim, K. B., Mogali, S. R. & Car, L. T. (2022). Virtual Reality in Medical Students' Education: Scoping Review. *JMIR medical education, 8*(1), e34860. <https://doi.org/10.2196/34860>
- Johnson-Glenberg, M. C. (2018). Immersive VR and Education: Embodied Design Principles That Include Gesture and Hand Controls. *Frontiers in robotics and AI, 5*, 81. <https://doi.org/10.3389/frobt.2018.00081>
- Johnson-Glenberg, M. C. (2019). The Necessary Nine: Design Principles for Embodied VR and Active Stem Education. In P. Díaz, A. Ioannou, K. K. Bhagat & J. M. Spector (Hrsg.), *Learning in a Digital World: Smart Computing and Intelligence* (1. Aufl., S. 83–112). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8265-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8265-9_5)

- Kaplan, D. (2001). Structural Equation Modeling. In N. J. Smelser & P. B. Baltes (Hrsg.), *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (S. 15215–15222). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b0-08-043076-7/00776-2>
- Kerres, M. (2003). Wirkungen und Wirksamkeit neuer Medien in der Bildung. In R. Keil-Slawik & M. Kerres (Hrsg.), *Wirkungen und Wirksamkeit Neuer Medien in der Bildung* (S. 31–44). Waxmann.
- Kirschner, P. A., Sweller, J. & Clark, R. E. (2006). Why Minimal Guidance During Instruction Does Not Work: An Analysis of the Failure of Constructivist, Discovery, Problem-Based, Experiential, and Inquiry-Based Teaching. *Educational Psychologist*, 41(2), 75–86. [https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102\\_1](https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102_1)
- Klein, C. (2023). Understanding the Relevance of Digital Media in Higher Education. *International Journal of Technology in Education and Science*, 7(1), 71–82. <https://doi.org/10.46328/ijtes.451>
- Kline, R. B. (2016). *Principles and practice of structural equation modeling* (4. Aufl.). Guilford Press.
- Klingler, K. (2014). *Structural Equation Modelling with Latent Variables - Evidence from a Monte Carlo Study* [Dissertation]. Heinrich-Heine-Universität, Freiburg im Breisgau. <https://docserv.uni-duesseldorf.de/servlets/DocumentServlet?id=34646>
- Klöß, S. (2021). *Zukunft der Consumer Technology 2021: Marktentwicklung & Mediennutzung, Trends & Technologien*. [https://www.bitkom.org/sites/default/files/2021-09/210817\\_ct\\_studie\\_2021.pdf](https://www.bitkom.org/sites/default/files/2021-09/210817_ct_studie_2021.pdf)
- Knorr, N. & Schröder, M. (2020). *Internationale Bildungsindikatoren im Ländervergleich*. Statistisches Landesamt Rheinland-Pfalz. [https://www.statistik.rlp.de/no\\_cache/de/gesellschaft-staat/bildung/pressemitteilungen/anzahlansicht/news/detail/News/3043/](https://www.statistik.rlp.de/no_cache/de/gesellschaft-staat/bildung/pressemitteilungen/anzahlansicht/news/detail/News/3043/)
- Kontra, C., Lyons, D. J., Fischer, S. M. & Beilock, S. L. (2015). Physical experience enhances science learning. *Psychological science*, 26(6), 737–749. <https://doi.org/10.1177/0956797615569355>
- Krokos, E., Plaisant, C. & Varshney, A. (2019). Virtual memory palaces: immersion aids recall. *Virtual Reality*, 23(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10055-018-0346-3>
- Kühne, O. (2018). *Landscape and Power in Geographical Space as a Social-Aesthetic Construct*. Springer Cham.
- Kumar Basak, S., Wotto, M. & Bélanger, P. (2018). E-learning, M-learning and D-learning: Conceptual definition and comparative analysis. *E-Learning and Digital Media*, 15(4), 191–216. <https://doi.org/10.1177/2042753018785180>
- Lee, S. & Kim, G. J. (2008). Effects of visual cues and sustained attention on spatial presence in virtual environments based on spatial and object distinction. *Interacting with Computers*, 20(4-5), 491–502. <https://doi.org/10.1016/j.intcom.2008.07.003>
- Lehrmann, A. L., Skovbjerg, H. M. & Arnfred, S. J. (2022). Design-based research as a research methodology in teacher and social education – a scoping review. *EDeR. Educational Design Research*, 6(3). <https://doi.org/10.15460/eder.6.3.1850>
- Li, X., Wang, S., Li, L., Sun, Y [Yongfu] & Xie, Y. (2020). Progress and Perspective for In Situ Studies of CO2 Reduction. *Journal of the American Chemical Society*, 142(21), 9567–9581. <https://doi.org/10.1021/jacs.0c02973>

- Lin, J.-W., Duh, H., Parker, D. E., Abi-Rached, H. & Furness, T. A. (2002). Effects of field of view on presence, enjoyment, memory, and simulator sickness in a virtual environment. In *Proceedings IEEE Virtual Reality 2002* (S. 164–171). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/VR.2002.996519>
- Linke, S. (2017). Ästhetik, Werte und Landschaft. In O. Kühne, H. Megerle & F. Weber (Hrsg.), *Landschaftsästhetik und Landschaftswandel* (S. 23–40). Springer VS.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-658-15848-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-658-15848-4_2)
- Liss, P. (1973). Processes of gas exchange across an air-water interface. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 20(3), 221–238. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(73\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0011-7471(73)90013-2)
- Liu, J [Jinke] & Han, G. (2021). Controlling factors of riverine CO<sub>2</sub> partial pressure and CO<sub>2</sub> outgassing in a large karst river under base flow condition. *Journal of Hydrology*, 593, 125638. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125638>
- Loomis, J. M., Blascovich, J. J. & Beall, A. C. (1999). Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behavior research methods, instruments, & computers*, 31(4), 557–564. <https://doi.org/10.3758/bf03200735>
- Lorke, A., Bodmer, P., Noss, C., Alshboul, Z., Koschorreck, M., Somlai-Haase, C., Bastviken, D., Flury, S., McGinnis, D. F., Maeck, A., Müller, D. & Premke, K. (2015). Technical note: drifting versus anchored flux chambers for measuring greenhouse gas emissions from running waters. *Biogeosciences*, 12(23), 7013–7024.  
<https://doi.org/10.5194/bg-12-7013-2015>
- Lößner, M. (2011). *Exkursionsdidaktik in Theorie und Praxis: Forschungsergebnisse und Strategien zur Überwindung von hemmenden Faktoren. Ergebnisse einer empirischen Untersuchung an mittelhessischen Gymnasien* [Dissertation]. Justus-Liebig-Universität Gießen, Gießen. [https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/geographiedidaktische-forschungen/gdf\\_48\\_loessner.pdf](https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/geographiedidaktische-forschungen/gdf_48_loessner.pdf)
- Luyssaert, S., Marie, G., Valade, A., Chen, Y.-Y., Njakou Djomo, S., Ryder, J., Otto, J., Naudts, K., Lansø, A. S., Ghattas, J. & McGrath, M. J. (2018). Trade-offs in using European forests to meet climate objectives. *Nature*, 562(7726), 259–262.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-018-0577-1>
- Mac Dowell, N., Fennell, P. S., Shah, N. & Maitland, G. C. (2017). The role of CO<sub>2</sub> capture and utilization in mitigating climate change. *Nature Climate Change*, 7(4), 243–249.  
<https://doi.org/10.1038/nclimate3231>
- Majernik, J. (2013). 3D Virtual Projection and Utilization of Its Outputs in Education of Human Anatomy. *Multimedia Technology (MT)*, 2(1).
- Makransky, G. & Petersen, G. B. (2021). The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL): a Theoretical Research-Based Model of Learning in Immersive Virtual Reality. *Educational Psychology Review*, 33(3), 937–958.  
<https://doi.org/10.1007/s10648-020-09586-2>
- Martens, J. & Ellmers, B. (2020). *Agenda 2030: Wo steht die Welt? 5 Jahre SDGs – eine Zwischenbilanz*. [https://www.2030agenda.de/sites/default/files/2030/zwischenbilanz/Agenda\\_2030\\_Zwischenbilanz\\_online-2.pdf](https://www.2030agenda.de/sites/default/files/2030/zwischenbilanz/Agenda_2030_Zwischenbilanz_online-2.pdf)
- Marvin Minsky (1980). Telepresence. *OMNI Magazine*, 44–52.



- Mayring, P. & Fenzl, T. (2019). Qualitative Inhaltsanalyse. In N. Baur & J. Blasius (Hrsg.), *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung* (S. 633–648). Springer VS. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-21308-4\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-658-21308-4_42)
- McBride, D. M. & Cutting, J. C. (2019). *Cognitive psychology: Theory, process, and methodology* (2. Aufl.). SAGE.
- McKenney, S. & Reeves, T. C. (2012). *Conducting educational design research*. Routledge.
- McNeish, D., An, J. & Hancock, G. R. (2018). The Thorny Relation Between Measurement Quality and Fit Index Cutoffs in Latent Variable Models. *Journal of personality assessment*, 100(1), 43–52. <https://doi.org/10.1080/00223891.2017.1281286>
- Meybeck, M. (1987). Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *American Journal of Science*, 287(5), 401–428. <https://doi.org/10.2475/ajs.287.5.401>
- Mikropoulos, T. A. & Bellou, J. (2006). The Unique Features of Educational Virtual Environments. In F. Bannister, P. Isaias & M. McPherson (Hrsg.), *Proceedings of the IADIS international conference E-society 2006* (S. 122–128). IADIS Press.
- Mikropoulos, T. A., Chalkidis, A., Katsikis, A. & Emvalotis, A. (1998). Students' Attitudes Towards Educational Virtual Environments. *Education and Information Technologies*, 3(2), 137–148. <https://doi.org/10.1023/A:1009687025419>
- Mikropoulos, T. A. & Natsis, A. (2011). Educational virtual environments: A ten-year review of empirical research (1999–2009). *Computers & Education*, 56(3), 769–780. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.10.020>
- Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur Rheinland-Pfalz. (2014). *Lehrpläne für die naturwissenschaftlichen Fächer für die weiterführenden Schulen in Rheinland-Pfalz.: Biologie Chemie Physik*. [https://naturwissenschaften.bildung-rp.de/fileadmin/user\\_upload/naturwissenschaften.bildung-rp.de/\\_Alt/pdf-download/Lehrplaene\\_Endversion\\_online.pdf](https://naturwissenschaften.bildung-rp.de/fileadmin/user_upload/naturwissenschaften.bildung-rp.de/_Alt/pdf-download/Lehrplaene_Endversion_online.pdf)
- Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Weiterbildung und Kultur Rheinland-Pfalz. (2016). *Lehrplan für die gesellschaftswissenschaftlichen Fächer: Erdkunde, Geschichte, Sozialkunde*. [https://studienseminar.rlp.de/fileadmin/user\\_upload/studienseminar.rlp.de/gy-ko/Fachseminare/Geschichte/Selbststudium/Erdkunde\\_Geschichte\\_Sozialkunde\\_LP\\_SekI.pdf](https://studienseminar.rlp.de/fileadmin/user_upload/studienseminar.rlp.de/gy-ko/Fachseminare/Geschichte/Selbststudium/Erdkunde_Geschichte_Sozialkunde_LP_SekI.pdf)
- Moore, J. W. & Fletcher, P. C. (2012). Sense of agency in health and disease: a review of cue integration approaches. *Consciousness and cognition*, 21(1), 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.concog.2011.08.010>
- Morrison, T. G., Morrison, M. A. & McCutcheon, J. M. (2017). Best Practice Recommendations for Using Structural Equation Modelling in Psychological Research. *Psychology*, 08(09), 1326–1341. <https://doi.org/10.4236/psych.2017.89086>
- Müller-Benedict, V. (2011). Konfidenzintervalle. In V. Müller-Benedict (Hrsg.), *Grundkurs Statistik in den Sozialwissenschaften* (S. 166–186). VS Verlag für Sozialwissenschaften. [https://doi.org/10.1007/978-3-531-93225-5\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-531-93225-5_9)
- Nakazawa, T., Machida, T., Sugawara, S., Murayama, S., Morimoto, S., Hashida, G., Honda, H. & Itoh, T. (1995). Measurements of the stratospheric carbon dioxide concentration over Japan using a Balloon-borne cryogenic sampler. *Geophysical Research Letters*, 22(10), 1229–1232. <https://doi.org/10.1029/95GL01188>

- Nakul, E., Orlando-Dessaints, N., Lenggenhager, B. & Lopez, C. (2020). Measuring perceived self-location in virtual reality. *Scientific reports*, 10(1), Artikel 6802. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63643-y>
- Nardini, M., Jones, P., Bedford, R. & Braddick, O. (2008). Development of cue integration in human navigation. *Current biology : CB*, 18(9), 689–693. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.04.021>
- Nerdinger, F. W., Blickle, G. & Schaper, N. (2019). *Arbeits- und Organisationspsychologie*. Springer Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56666-4>
- OECD. (2017). *Bildung auf einen Blick 2017*. W. Bertelsmann Verlag. <https://doi.org/10.1787/eag-2017-de>
- Olbrecht, T. (2010). *Akzeptanz von E-Learning: Eine Auseinandersetzung mit dem Technologieakzeptanzmodell zur Analyse individueller und sozialer Einflussfaktoren* [Dissertation]. Friedrich-Schiller-Universität Jena, Jena. [https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt\\_derivate\\_00021996/Olbrecht/Dissertation.pdf](https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt_derivate_00021996/Olbrecht/Dissertation.pdf)
- Pellas, N., Dengel, A. & Christopoulos, A. (2020). A Scoping Review of Immersive Virtual Reality in STEM Education. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 13(4), 748–761. <https://doi.org/10.1109/TLT.2020.3019405>
- Pereira, R., Ashton, I., Sabbaghzadeh, B., Shutler, J. D. & Upstill-Goddard, R. C. (2018). Reduced air–sea CO<sub>2</sub> exchange in the Atlantic Ocean due to biological surfactants. *Nature Geoscience*, 11(7), 492–496. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0136-2>
- Piaget, J. (1959). *The Language and Thought of the Child* (3. Aufl.). Routledge.
- Pilgrim, A. & Schmitt, B. (2021). Organisation von digital unterstützten Lernprozessen – Erprobung einer substanziellen Lernumgebung zum Aufgabenformat Rechendreieck. In A. Pilgrim, M. Nolte & T. Huhmann (Hrsg.), *Mathematik treiben mit Grundschulkindern – Konzepte statt Rezepte. Festschrift für Günter Krauthausen* (S. 137–151). WTM-Verlag Münster. <https://doi.org/10.37626/GA9783959871624.0.11>
- Poeschl, S. & Doering, N. (2013). The German VR Simulation Realism Scale--psychometric construction for virtual reality applications with virtual humans. *Studies in health technology and informatics*, 191, 33–37.
- Pirker, J. & Dengel, A. (2021). The Potential of 360° Virtual Reality Videos and Real VR for Education-A Literature Review. *IEEE computer graphics and applications*, 41(4), 76–89. <https://doi.org/10.1109/MCG.2021.3067999>
- Potka, J. (1995). Immersive training systems: Virtual reality and education and training. *Instructional Science*, 23(5-6), 405–431. <https://doi.org/10.1007/BF00896880>
- Pu, J., Li, J., Khadka, M. B., Martin, J. B., Zhang, T., Yu, S. & Yuan, D. (2017). In-stream metabolism and atmospheric carbon sequestration in a groundwater-fed karst stream. *The Science of the total environment*, 579, 1343–1355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.132>
- Pumpanen, J., Kolari, P., Ilvesniemi, H., Minkinen, K., Vesala, T., Niinistö, S., Lohila, A., Larmola, T., Morero, M., Pihlatie, M., Janssens, I., Yuste, J. C., Grünzweig, J. M., Reth, S., Subke, J.-A., Savage, K., Kutsch, W., Østreg, G., Ziegler, W., . . . Hari, P. (2004). Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO<sub>2</sub> efflux. *Agricultural and Forest Meteorology*, 123(3-4), 159–176. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2003.12.001>

- Qu, B., Aho, K. S., Li, C., Kang, S., Sillanpää, M., Yan, F. & Raymond, P. A. (2017). Greenhouse gases emissions in rivers of the Tibetan Plateau. *Scientific reports*, 7(1), 16573. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16552-6>
- Rawitch, M. J., Macpherson, G. L. & Brookfield, A. E. (2021). The validity of floating chambers in quantifying CO<sub>2</sub> flux from headwater streams. *Journal of Water and Climate Change*, 12(2), 453–468. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.199>
- Raymond, P. A., Zappa, C. J., Butman, D., Bott, T. L., Potter, J., Mulholland, P., Laursen, A. E., McDowell, W. H. & Newbold, D. (2012). Scaling the gas transfer velocity and hydraulic geometry in streams and small rivers. *Limnology and Oceanography: Fluids and Environments*, 2(1), 41–53. <https://doi.org/10.1215/21573689-1597669>
- Regnier, P., Friedlingstein, P., Ciais, P., Mackenzie, F. T., Gruber, N., Janssens, I. A., Laruelle, G. G., Lauerwald, R., Luysaert, S., Andersson, A. J., Arndt, S., Arnosti, C., Borges, A. V., Dale, A. W., Gallego-Sala, A., Godd ris, Y., Goossens, N., Hartmann, J., Heinze, C., [...] Thullner, M. (2013). Anthropogenic perturbation of the carbon fluxes from land to ocean. *Nature Geoscience*, 6(8), 597–607. <https://doi.org/10.1038/ngeo1830>
- Reinecke, J. & Pöge, A. (2010). Strukturgleichungsmodelle. In C. Wolf & H. Best (Hrsg.), *Handbuch der sozialwissenschaftlichen Datenanalyse* (S. 775–804). VS Verlag für Sozialwissenschaften. [https://doi.org/10.1007/978-3-531-92038-2\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-531-92038-2_29)
- Reineke, W. & Schlömann, M. (2020). *Umweltmikrobiologie* (3. Aufl.). Springer Spektrum Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-59655-5>
- Reinmann, G. (2005). Innovation ohne Forschung? Ein Plädoyer für den Design-Based Research-Ansatz in der Lehr-Lernforschung. *Unterrichtswissenschaft*, 33(1), 52–69. <https://doi.org/10.25656/01:5787>
- Reinmann, G. (2017). Design-Based Research. In D. Schemme & H. Novak (Hrsg.), *Berichte zur beruflichen Bildung. Gestaltungsorientierte Forschung - Basis für soziale Innovationen: Erprobte Ansätze im Zusammenwirken von Wissenschaft und Praxis* (S. 49–61). W. Bertelsmann Verlag.
- Reiss, K., S lzer, C., Schiepe-Tiska, A., Klieme, E. & K ller, O. (Hrsg.). (2016). *PISA 2015: Eine Studie zwischen Kontinuität und Innovation*. Waxmann.
- Rheinberg, F. & Vollmeyer, R. (2019). *Motivation* (9. Aufl.). *Grundriss der Psychologie: Bd. 6*. W. Kohlhammer.
- Rheinberg, F., Vollmeyer, R. & Burns, B. D. (2001). FAM: Ein Fragebogen zur Erfassung aktueller Motivation in Lern- und Leistungssituationen. *Diagnostica*, 47(2), 57–66. <https://doi.org/10.1026//0012-1924.47.2.57>
- Richey, R. C. & Klein, J. D. (2007). *Design and Development Research* (1. Aufl.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203826034>
- Riha, C., G ntensperger, D., Oswald, J., Kleinjung, T. & Meyer, M. (2021). Application of Latent Growth Curve modeling to predict individual trajectories during neurofeedback treatment for tinnitus. *Progress in brain research*, 263, 109–136. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2021.04.013>
- Risch, B., Engl, A., Rieger, M. B., Rudolf, B. & Schehl, M. (2019). Reallabor Queichland. Gemeinsames Gestalten einer Lernumgebung im Kontext Nachhaltigkeit. *ZEP* :

- Zeitschrift für internationale Bildungsforschung und Entwicklungspädagogik*, 42(3), 22–26. <https://doi.org/10.25656/01:21305>
- Roth, D. (2020). *Intrapersonal, Interpersonal, and Hybrid Interactions in Virtual Reality* [Dissertation]. Universität Würzburg, Würzburg. <https://doi.org/10.25972/OPUS-18862>
- Roy, M. & Schlemminger, G. (2014). Immersion und Interaktion in virtuellen Realitäten: Der Faktor Präsenz zur Optimierung des geleiteten Sprachenlernens. *Zeitschrift für Interkulturellen Fremdsprachenunterricht*, 19(2).
- Ruddle, R. A., Volkova, E. & Bühlhoff, H. H. (2013). Learning to walk in virtual reality. *ACM Transactions on Applied Perception*, 10(2), 1–17. <https://doi.org/10.1145/2465780.2465785>
- Rupp, M. A., Kozachuk, J., Michaelis, J. R., Odette, K. L., Smither, J. A. & McConnell, D. S. (2016). The effects of immersiveness and future VR expectations on subjective-experiences during an educational 360° video. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 60(1), 2108–2112. <https://doi.org/10.1177/1541931213601477>
- Sato, A. & Yasuda, A. (2005). Illusion of sense of self-agency: discrepancy between the predicted and actual sensory consequences of actions modulates the sense of self-agency, but not the sense of self-ownership. *Cognition*, 94(3), 241–255. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.04.003>
- Schäfer, M. & Diezemann, E. (2017). Design Based Research an Designbasierter Didaktik: Zur Methodologie und Durchführung einer innovationsorientierten Forschung in der KFZ-Erstausbildung. *Berufs- und Wirtschaftspädagogik - online*(33), 1-23.
- Schäfer, T. (2016a). Explorative Datenanalyse: Muster und Zusammenhänge erkennen. In T. Schäfer (Hrsg.), *Methodenlehre und Statistik* (S. 83–108). Springer Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-11936-2\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-658-11936-2_4)
- Schäfer, T. (2016b). Inferenzstatistische Aussagen für Zusammenhangs- und Unterschiedshypothesen. In T. Schäfer (Hrsg.), *Methodenlehre und Statistik* (S. 139–173). Springer Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-11936-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-658-11936-2_7)
- Schäfer, T. (2016c). Unterschiede zwischen mehr als zwei Gruppen: die Varianzanalyse. In T. Schäfer (Hrsg.), *Methodenlehre und Statistik* (S. 217–237). Springer Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-11936-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-658-11936-2_11)
- Schall, P. & Ammer, C. (2013). How to quantify forest management intensity in Central European forests. *European Journal of Forest Research*, 132(2), 379–396. <https://doi.org/10.1007/s10342-013-0681-6>
- Schulze, E. D., Bouriaud, O., Irlinger, R. & Valentini, R. (2022). The role of wood harvest from sustainably managed forests in the carbon cycle. *Annals of Forest Science*, 79(1). <https://doi.org/10.1186/s13595-022-01127-x>
- Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland. (2004). *Bildungsstandards im Fach Chemie für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10)*. [https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\\_beschluesse/2004/2004\\_12\\_16-Bildungsstandards-Chemie.pdf](https://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen_beschluesse/2004/2004_12_16-Bildungsstandards-Chemie.pdf)
- Sitch, S., Friedlingstein, P., Gruber, N., Jones, S. D., Murray-Tortarolo, G., Ahlström, A., Donney, S. C., Graven, H., Heinze, C., Huntingford, C., Levis, S., Levy, P. E., Lomas, M.,

- Poulter, B., Viovy, N., Zaehle, S., Zeng, N., Arneth, A., Bonan, G., . . . Myneni, R. (2015). Recent trends and drivers of regional sources and sinks of carbon dioxide. *Bio-geosciences*, 12(3), 653–679. <https://doi.org/10.5194/bg-12-653-2015>
- Skalski, P. & Tamborini, R. (2007). The Role of Social Presence in Interactive Agent-Based Persuasion. *Media Psychology*, 10(3), 385–413. <https://doi.org/10.1080/15213260701533102>
- Slater, M. (2003). *A Note on Presence Terminology*. University College London. [https://www.researchgate.net/publication/242608507\\_A\\_Note\\_on\\_Presence\\_Terminology](https://www.researchgate.net/publication/242608507_A_Note_on_Presence_Terminology)
- Stephenson, N. L., Das, A. J., Condit, R., Russo, S. E., Baker, P. J., Beckman, N. G., Coomes, D. A., Lines, E. R., Morris, W. K., Rüger, N., Alvarez, E., Blundo, C., Bunyavejchewin, S., Chuyong, G., Davies, S. J., Duque, A., Ewango, C. N., Flores, O., Franklin, J. F., [...] Zavala, M. A. (2014). Rate of tree carbon accumulation increases continuously with tree size. *Nature*, 507(7490), 90–93. <https://doi.org/10.1038/nature12914>
- Stotten, R. (2013). Kulturlandschaft gemeinsam verstehen – Praktische Beispiele der Landschaftssozialisation aus dem Schweizer Alpenraum. *Geographica Helvetica*, 68(2), 117–127. <https://doi.org/10.5194/gh-68-117-2013>
- Stuckey, M., Sperling, J. P., Hofstein, A., Mamlok-Naaman, R. & Eilks, I. (2014). Ein Beitrag zum Verständnis der Relevanz des Chemieunterrichts. *CHEMKON*, 21(4), 175–180. <https://doi.org/10.1002/ckon.201410227>
- Sturm, G. (2010). Forschungsmethodologie. In R. Becker & B. Kortendiek (Hrsg.), *Handbuch Frauen- und Geschlechterforschung* (S. 400–408). VS Verlag für Sozialwissenschaften. [https://doi.org/10.1007/978-3-531-92041-2\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-531-92041-2_48)
- Tai, T.-Y., Chen, H. H.-J. & Todd, G. (2022). The impact of a virtual reality app on adolescent EFL learners' vocabulary learning. *Computer Assisted Language Learning*, 35(4), 892–917. <https://doi.org/10.1080/09588221.2020.1752735>
- Tamborini, R. & Skalski, P. (2006). The role of presence in the experience of electronic games. In P. Vorderer & J. Bryant (Hrsg.), *LEA's communication series. Playing video games: Motives, responses, and consequences* (S. 225–240). Routledge.
- Telmer, K. & Veizer, J. (1999). Carbon fluxes, pCO<sub>2</sub> and substrate weathering in a large northern river basin, Canada: carbon isotope perspectives. *Chemical Geology*, 159(1-4), 61–86. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00034-0](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00034-0)
- Theyßen, H. (2014). Methodik von Vergleichsstudien zur Wirkung von Unterrichtsmedien. In D. Kruger & Parchmann (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 67–79). Springer Spektrum Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-37827-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-642-37827-0_6)
- Ulseth, A. J., Hall, R. O., Boix Canadell, M., Madinger, H. L., Niayifar, A. & Battin, T. J. (2019). Distinct air–water gas exchange regimes in low- and high-energy streams. *Nature Geoscience*, 12(4), 259–263. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0324-8>
- Vahdat, K. & Shashaani, S. (2021). Non-Parametric Uncertainty Bias and Variance Estimation via Nested Bootstrapping and Influence Functions. In *2021 Winter Simulation Conference (WSC)* (S. 1–12). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC52266.2021.9715420>

- Venkatesh, V. (2000). Determinants of Perceived Ease of Use: Integrating Control, Intrinsic Motivation, and Emotion into the Technology Acceptance Model. *Information Systems Research*, 11(4), 342–365. <https://doi.org/10.1287/isre.11.4.342.11872>
- Vergara, D., Rubio, M. & Lorenzo, M. (2017). On the Design of Virtual Reality Learning Environments in Engineering. *Multimodal Technologies and Interaction*, 1(2), 11. <https://doi.org/10.3390/mti1020011>
- Vorderer, P., Wirth, W., Gouveia, F. R., Biocca, F., Saari, T., Jäncke, L., Böcking, S., Schramm, H., Gysbers, A., Hartmann, T., Klimmt, C., Laarni, J., Ravaja, N., Sacau, A. & Baumgartner, Thomas & Jäncke, Petra. (2004). *MEC Spatial Presence Questionnaire (MEC-SPQ): Short Documentation and Instructions for Application. Report to the European Community, Project Presence: MEC (IS T-2001-37661)*. [https://www.researchgate.net/publication/318531435\\_MEC\\_spatial\\_presence\\_questionnaire\\_MEC-SPQ\\_Short\\_documentation\\_and\\_instructions\\_for\\_application](https://www.researchgate.net/publication/318531435_MEC_spatial_presence_questionnaire_MEC-SPQ_Short_documentation_and_instructions_for_application)
- Wagner, I., Bartsch, F. & Rulofs, B. (2021). Unterschiede zwischen Schüler\*innen im Sportunterricht in der Wahrnehmung von Lehrkräften. *German Journal of Exercise and Sport Research*, 51(3), 277–289. <https://doi.org/10.1007/s12662-021-00716-8>
- Waldrop, M. M. (2015). Why we are teaching science wrong, and how to make it right. *Nature*, 523, 272–274. <https://doi.org/10.1038/523272a>
- Waltemate, T., Gall, D., Roth, D., Botsch, M. & Latoschik, M. E. (2018). The Impact of Avatar Personalization and Immersion on Virtual Body Ownership, Presence, and Emotional Response. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 24(4), 1643–1652. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2018.2794629>
- Wang, F. & Hannafin, M. J. (2005). Design-based research and technology-enhanced learning environments. *Educational Technology Research and Development*, 53(4), 5–23. <https://doi.org/10.1007/BF02504682>
- Wang, M., Ran, W., Liao, J. & Yang, S. J. (2010). A Performance-Oriented Approach to E-Learning in the Workplace. *Journal of Educational Technology & Society*, 13(4), 167–179.
- Wanninkhof, R., Asher, W. E., Ho, D. T., Sweeney, C. & McGillis, W. R. (2009). Advances in quantifying air-sea gas exchange and environmental forcing. *Annual review of marine science*, 1, 213–244. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163742>
- Weinert, F. E. (2001). Vergleichende Leistungsmessung in Schulen - eine umstrittene Selbstverständlichkeit. In F. E. Weinert (Hrsg.), *Leistungsmessungen in Schulen* (S. 17–32). Beltz.
- Wirth, W. (2012). Präsenzerleben und Involvement in neuen Medien. In L. Reinecke (Hrsg.), *Unterhaltungsforschung: Bd. 7. Unterhaltung in neuen Medien: Perspektiven zur Rezeption und Wirkung von Online-Medien und interaktiven Unterhaltungsformaten* (S. 100–121). Halem.
- Wirth, W., Böcking, S., In-Albon & Natascha. (2006). Spannung und Präsenzerleben beim Lesen fiktionaler, narrativer Texte. In H. Schramm, W. Wirth & H. Bilandzic (Hrsg.), *Empirische Unterhaltungsforschung: Studien zu Rezeption und Wirkung von medialer Unterhaltung* (S. 107–128). Fischer.
- Wirth, W., Hartmann, T., Böcking, S., Vorderer, P., Klimmt, C., Schramm, H., Saari, T., Laarni, J., Ravaja, N., Gouveia, F. R., Biocca, F., Sacau, A., Jäncke, L.,

- Baumgartner, T. & Jäncke, P. (2007). A Process Model of the Formation of Spatial Presence Experiences. *Media Psychology*, 9(3), 493–525.  
<https://doi.org/10.1080/15213260701283079>
- Wirth, W., Hofer, M. & Schramm, H. (2012). The Role of Emotional Involvement and Trait Absorption in the Formation of Spatial Presence. *Media Psychology*, 15(1), 19–43.  
<https://doi.org/10.1080/15213269.2011.648536>
- Wirth, W., Schramm, H., Böcking, S., Gysbers, A., Hartmann, T., Klimmt, C. & Vorderer, P. (2008). Entwicklung und Validierung eines Fragebogens zur Entstehung von räumlichem Präsenzerleben. In J. Matthes (Hrsg.), *Methoden und Forschungslogik der Kommunikationswissenschaft.: Bd. 3. Die Brücke zwischen Theorie und Empirie: Operationalisierung, Messung und Validierung in der Kommunikationswissenschaft* (S. 70–95). von Halem.
- Wöhrle, D. (2021). Kohlenstoffkreislauf und Klimawandel. *Chemie in unserer Zeit*, 55(2), 112–124. <https://doi.org/10.1002/ciuz.201900061>
- Woolfolk, A. (2014). *Pädagogische Psychologie* (12. Aufl.). Pearson.
- Xiong, J., Hsiang, E.-L., He, Z., Zhan, T. & Wu, S.-T. (2021). Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives. *Light, science & applications*, 10(1), Artikel 216. <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00658-8>
- Yao, G., Gao, Q., Wang, Z., Huang, X., He, T., Zhang, Y., Jiao, S. & Ding, J. (2007). Dynamics of CO<sub>2</sub> partial pressure and CO<sub>2</sub> outgassing in the lower reaches of the Xijiang River, a subtropical monsoon river in China. *The Science of the total environment*, 376(1-3), 255–266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.01.080>
- Zender, R., Weise, M., Heyde, M. von der & Söbke, H. (2018). Chancen und Herausforderungen beim Lernen und Lehren mit VR/AR-Technologien. In D. Krömker & U. Schroeder (Hrsg.), *DeLFI 2018: Die 16. E-Learning Fachtagung Informatik der Gesellschaft für Informatik e.V.* (S. 275–276). Köllen Druck+Verlag GmbH.
- Zhang, C. (2020). Investigation on Motion Sickness in Virtual Reality Environment from the Perspective of User Experience. In *2020 IEEE 3rd International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE)* (S. 393–396). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/ICISCAE51034.2020.9236907>
- Zhang, X., Jiang, S., Ordóñez de Pablos, P., Lytras, M. D. & Sun, Y [Yongqiang] (2017). How virtual reality affects perceived learning effectiveness: a task–technology fit perspective. *Behaviour & Information Technology*, 36(5), 548–556.  
<https://doi.org/10.1080/0144929X.2016.1268647>

## **I. Danksagung**

Nun möchte ich meinen besonderen Dank den nachfolgenden Personen entgegenbringen.

Ich danke Herrn Prof. Dr. Björn Risch, dass er diese Arbeit betreut und es mir so ermöglicht hat meinen akademischen Weg nach dem Studium fortzuführen. Er hatte stets ein offenes Ohr und ermöglichte einen sehr bereichernden und konstruktiven Austausch. Dadurch wurde mein Blick für die Wissenschaft geschärft, mein Denken kritischer und mein Wissen stets umfangreicher.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr. Engelbert Niehaus für die wissenschaftliche Betreuung als Zweitgutachter und die stets offene Tür - auch über die Dissertationsthematik hinweg für andere Forschungsbereiche und Anliegen.

Ebenso danke ich den Mitgliedern der gesamten AG Chemiedidaktik unter der Leitung von Prof. Dr. Björn Risch die während meiner Zeit als Promotionsstudent dabei waren. Es war immer eine Freude im gemeinschaftlichen Diskurs über verschiedenste Forschungsthemen zu reden und den eigenen Horizont dadurch stets zu erweitern. Besonders danke ich Dr. Alexander Engl und Simeon Wallrath. Die gemeinsamen kritischen Gespräche über den Themenkomplex VR mit Alexander haben mir stets Antrieb gegeben. Simeons 3-D Modellierkünste bereicherten die VR-Lernumgebung und der Diskurs über technischen Gegebenheiten war immer bereichernd.

Ein großer Dank geht ebenfalls an meine alte Wohngemeinschaft: Dr. Kilian Hasselhorn, Robin Lang und Dr. Moritz Walz. Gemeinsam haben wir unsere Promotionszeit in unterschiedlichen Fachbereichen (Psychologie, Sport, Mathe, Chemie) angefangen und auf ebenso unterschiedliche Weise vorangetrieben und beendet. Wir haben uns stets gegenseitig Kraft und Zuversicht gegeben sowie ein offenes Ohr füreinander gehabt damit wir alle die persönlich gesteckten Ziele erreichen.

Ein besonderer Dank geht an meine Familie, die mich stets unterstützt und mir den Lebensweg bis zu diesem Punkt ermöglicht hat.

Der größte Dank gilt meiner Verlobten Julia. Sie hat mich auch in stressigen Zeiten ertragen, mir Mut zugesprochen, meine Launen ausgehalten und mich in meinen Vorhaben bestärkt. Für dieses besondere Verständnis bei der Anfertigung der Doktorarbeit bin ich ihr tief verbunden.

Der ungewöhnlichste Dank gilt zuletzt meinem Border-Collie Finn. Er hat mich stets auf liebevolle Weise vom PC und der Arbeit weggelockt, um mir die Pausen zu gönnen, die ich stets dringend gebraucht habe.



## II. Publikations- und Vortragsliste

Publikationen und Vorträge die im Rahmen dieses Dissertationsprojekts entstanden sind.

### Publikationen

Rieger, M. B. & Risch, B. (2023). How to Maximise Spatial Presence: Design Guidelines for a Virtual Learning Environment for School Use. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 29 (5), S. 2517-2526. IEEE.

Rieger, M. B., Wallrath, S., Engl, A., Risch, B. (2023). Formulierung von Gestaltungsprinzipien für schulisch geeignete VR-Lernumgebungen. In: Roth, J., Baum, M., Eilerts, K., Hornung, G., Trefzger, T. (Hrsg.) *Die Zukunft des MINT-Lernens – Band 2* (S. 137-150.). Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.

Rieger, M. B. & Risch, B. (2020). WebVR – Making Educational Content a Public Experience. CERN, Geneva, Switzerland: Zenodo.

Rieger, M., Engl, A. & Risch, B. (2020). Virtuelle Exkursionen 2.0 – Neue Technologien für zukünftiges Lernen. In: S. Habig (Hrsg.), *Naturwissenschaftliche Kompetenzen in der Gesellschaft von morgen* (S. 697). Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik, Jahrestagung in Wien 2019, Universität Duisburg-Essen.

### Vorträge

IEEEVR 2023 vom 25.03. bis 29.03. 2023 in Shanghai. Titel: How to Maximise Spatial Presence: Design Guidelines for a Virtual Learning Environment for School Use.

GDCP-Tagung 2022 vom 12.09. bis 15.09.2022 in Aachen. Titel: Formulierung von Gestaltungsprinzipien für VR-Lernumgebungen.

Open Search Symposium (OSSYM) 2020 in Genf (CERN). Titel: WebVR – Making Educational Content a Public Experience.

## III. Verzeichnisse

### a. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einbindung der Skala zur Erfassung räumlichen Präsenzerlebens (MEC SPQ) (Vorderer et al. 2004). Erhebungsskalen (rot) in eine verallgemeinerte Darstellung des MEC-Modells räumlichen Präsenzerlebens (Hartmann et al. 2005). Eigene Darstellung.....	6
Abbildung 2: Exemplarische Darstellung der Teilmengen von D-Learning. Eigene Darstellung. ....	11
Abbildung 3: Darstellung des CAMIL Framework nach Makransky und Peterson (2021). ...	13

Abbildung 4: Sechs-Phasen-Modell von Euler (2014) erweitert um Designschritte nach Vergara, Rubio und Lorenzo (2017). .....	23
Abbildung 5: Darstellung des Workflows der Mikrozyklen. ....	24
Abbildung 6: Darstellung der Reihenfolge der Mikrozyklen.....	25
Abbildung 7: Erhebungsraum in dem MZ null, MZ eins und die 2x2 Meter Gruppe von MZ zwei durchgeführt wurden. ....	27
Abbildung 8: Konzeptionelle Darstellung der Bewegungsradien in der VR-Lernumgebung mit den Lernstationen aus der Vogelperspektive. Hinweis: Die Grasdichte auf den Screenshots nimmt mit zunehmender Distanz ab, da die Screenshots im Editormodus aufgenommen wurden. Dies ist eine Einstellung, um Rechenleistung während der Bearbeitung der Fläche zu sparen. ....	29
Abbildung 9: Experimentierutensilien mit Moringa-Protein (rot) und einem Molekülprototyp im ersten VR-Prototyp in A-Frame. ....	32
Abbildung 10: Darstellung der 360° Kuppel um die Grundfläche der VR-Lernumgebung (Mitte) aus der Unreal Engine. ....	34
Abbildung 11: Hochauflösendes HDRI Bild welches in der Evaluation des Mikrozyklus 1 verwendet wurde. Die große Grundfläche in den unteren 50% des Bildes wurde als flacher Boden gespannt, während die oberen 50% des Bildes zu einer Kuppel geformt wurden, um die Form aus Abbildung 13 anzunehmen. Das Bild ist kostenlos verfügbar unter: <a href="https://polyhaven.com/a/approaching_storm">https://polyhaven.com/a/approaching_storm</a> . ....	34
Abbildung 12: Ursprünglich geplante Vegetation am Flussufer, welche aufgrund von Hardwarelimitationen in der VR-Version nicht möglich war. ....	35
Abbildung 13: In MZ eins evaluierter Prototyp ohne die geplante Vegetation. ....	36
Abbildung 14: Die aktualisierten Baum-Modelle im Vordergrund mit dem neuen, hochauflösenden 16 K HDRI-Bild, um die Kohärenz der Umgebung zu gewährleisten.....	37
Abbildung 15: Darstellung des Kohlenstoffkreislaufs nach Wöhrle (2021). ....	38
Abbildung 16: Realer Nachbau einer Floating-Chamber (oben). 3-D-Modell in der VR-Lernumgebung (unten). Eingebaute Sensoren unterhalb der Driftkammer (rechts oben und unten). ....	40
Abbildung 18: Zusammenbau der Floating-Chamber (links) mit Sensoren und einem Deckel. ....	41
Abbildung 17: Die Projektor-Einheit (schwarz) musste zum Starten der Station in das blaue Hologramm auf dem Stationstisch gesetzt werden. ....	41
Abbildung 19: Darstellung des Wegs vom Stationstisch zum Fluss, um die Messung zu starten. Im virtuellen Raum sind die Arbeitsschritte eingeblendet, die als Stimme hörbar waren. ....	42
Abbildung 20: Ablesen der Messwerte auf dem Tablet, während die Floating Chamber auf dem Fluss liegt. ....	42
Abbildung 22: Eingeblendete Notizen der zweiten Lernstation als Hilfestellung. ....	45
Abbildung 21: Sichtbar-Machen des ausgasenden CO <sub>2</sub> durch die chemische Lupe (rechts). Direkt vor dem Fluss befindet sich der „Queich-O-Tron 3000“ mit den vier Hebeln in der Mitte sowie den zwei Antwortfeldern rechts und links (links). ....	45

Abbildung 23: Die Apparatur, um die Bäume altern zu lassen oder zu verjüngen. Mit den Pfeil-Knöpfen wurde das Alter manipuliert und gleichzeitig das 3-D-Modell des Baums verändert.....	47
Abbildung 24: Anbringen der Pins am Pinnboard. ....	47
Abbildung 25: Am Ende des eingblendeten Videos (hinten rechts), erschienen zusammenfassende Stichpunkte des Inhalts des Videoclips. ....	48
Abbildung 26: Screenshot aus dem Lehrplan Erdkunde (S. 25) des Bundeslands Rheinland-Pfalz. Ausschnitt aus einem Beispiel zum Aufbau eines geographischen Fachverständnisses am Beispiel des „Rheins“ in verschiedenen Klassenstufen.....	50
Abbildung 27: Verlauf der Mikrozyklusevaluation mit den jeweils eingesetzten Skalen. ....	53
Abbildung 28: Zeitstrahl der Startzeitpunkte der Erhebungen der Mikrozyklen mit Gruppenzuweisung. MZ = Mikrozyklus. ....	55
Abbildung 29: Darstellung der Wirkpfade in einem Pfaddiagramm des Prozessmodells des räumlichen Präsenzerlebens mit allen Variablen. Grün markiert sind mögliche signifikante und schwarz insignifikante Effekte. ....	59
Abbildung 30: Skala Räumliches Präsenzerleben. Kumuliert aus den Skalen Selbstlokation und Handlungsmöglichkeiten.....	63
Abbildung 31: Skala Selbstlokation des MEC SPQ.....	64
Abbildung 32: Skala Handlungsmöglichkeiten des MEC SPQ. ....	65
Abbildung 33: Skala Räumliches Situationsmodell des MEC SPQ. ....	66
Abbildung 34: Skala Involvement des MEC SPQ. ....	67
Abbildung 35: Skala Suspension of Disbelief des MEC SPQ. ....	68
Abbildung 36: Skala Aufmerksamkeit des MEC SPQ.....	69
Abbildung 37: Skala Räumliches Vorstellungsvermögen des MEC SPQ. ....	70
Abbildung 38: Skala Domänenspezifisches Interesse des MEC SPQ. ....	71
Abbildung 39: Skala Interesse des FAM. Inklusive MZ null. ....	72
Abbildung 40: Skala Interesse des FAM. Exklusive MZ null. ....	73
Abbildung 41: Skala Misserfolgsbefürchtung des FAM. Inklusive MZ null. ....	74
Abbildung 42: Skala Misserfolgsbefürchtung des FAM. Exklusive MZ null. ....	75
Abbildung 43: Skala Erfolgswahrscheinlichkeit des FAM. Inklusive MZ null.....	76
Abbildung 44: Skala Herausforderung des FAM. Inklusive MZ null.....	77
Abbildung 45: Skala Herausforderung des FAM. Exklusive MZ null. ....	78
Abbildung 46: Skala Realismus. Mikrozyklus eins bis sechs. ....	79
Abbildung 47: Skala Wahrgenommene Bedienbarkeit. Mikrozyklus null und vier bis sechs. ....	80
Abbildung 48: Skala Wahrgenommene Lerneffektivität. Mikrozyklus vier bis sechs. ....	81
Abbildung 49: VR-Skala. Mikrozyklus vier bis sechs. ....	82
Abbildung 50: Korrelationsmatrix der eingesetzten Skalen des FAM, Realismus und MEC SPQ über die Erhebungszeitpunkte Mikrozyklus eins bis sechs.....	83
Abbildung 51: Korrelationsmatrix der Skalen, die auch in Mikrozyklus 0 eingesetzt wurden, über die Erhebungszeitpunkte Mikrozyklus null bis sechs. ....	84
Abbildung 52: Korrelationsmatrix der Skalen Wahrgenommene Bedienbarkeit, VR-Skala und Wahrgenommene Lerneffektivität mit den eingesetzten Skalen des FAM, Realismus und des MEC SPQ in den Mikrozyklen vier bis sechs.....	84

Abbildung 53: Prozentuale Verteilung der wahrgenommenen Störung des Kabels der VR-Brille mit Ja (Y) und Nein (N). .....	85
Abbildung 54: Boxplot Diagramm der Subskalen Interesse (I), Misserfolgsbefürchtung (M), Erfolgswahrscheinlichkeit (E) und Herausforderung (H) des FAM. ....	86
Abbildung 55: Ergebnisse der Skala Wahrgenommene Bedienbarkeit. ....	87
Abbildung 56: Ergebnisse der Subskala Domänenspezifisches Interesse. ....	87
Abbildung 57: Pfadanalyse des Mikrozyklus 1.....	89
Abbildung 58: Pfadanalyse des 2x2 Meter Radius. ....	91
Abbildung 59: Pfadanalyse des 4x4 Meter Radius. ....	93
Abbildung 60: Pfadanalyse des 6x6 Meter Radius. ....	94
Abbildung 61: Räumliches Präsenzerleben der Bewegungsradien 2x2, 4x4 und 6x6 Meter. .	95
Abbildung 62: Bewegungsradius für Lernstation 1. ....	96
Abbildung 63: Bewegungsradius für Lernstation 2. ....	96
Abbildung 64: Bewegungsradius für Lernstation 3. ....	97
Abbildung 65: Pfadanalyse des Mikrozyklus 3.....	98
Abbildung 66: Pfadanalyse des Mikrozyklus 4.....	100
Abbildung 67: Pfadanalyse des Mikrozyklus 5.....	102
Abbildung 68: Pfadanalyse des Mikrozyklus 6.....	104
Abbildung 69: Konzeptionelle Darstellung der Respezifikation des Prozessmodells mit Wirkpfaden (blau) und möglicher Wechselwirkung (rot).....	117
Abbildung 70: Pfadanalyse des respezifizierten Modells in MZ vier.....	118
Abbildung 71: Pfadanalyse des respezifizierten Modells in MZ fünf.....	119
Abbildung 72: Pfadanalyse des respezifizierten Modells in MZ sechs.....	120

## **b. Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Din-genormte Flächen von Schulsporthallen in Relation zu den gewählten Bewegungsradien. ....	27
Tabelle 2: Zusammenfassung des Skaleneinsatzes, der Modellfit Cut-off Werte sowie der berichteten Effektgrößen und Korrelationen. Literaturangaben sind in den jeweiligen Unterkapiteln zu entnehmen.....	52
Tabelle 3: Tukey-Test: Räumliches Präsenzerleben. ....	63
Tabelle 4: Tukey-Test: Selbstlokation. ....	64
Tabelle 5: Games-Howell-Test: Handlungsmöglichkeiten. ....	65
Tabelle 6: Tukey-Test: Räumliches Situationsmodell .....	66
Tabelle 7: Tukey-Test: Involvement. ....	67
Tabelle 8: Tukey-Test: Räumliches Vorstellungsvermögen.....	70
Tabelle 9: Tukey-Test: Interesse inklusive MZ null. ....	72
Tabelle 10: Tukey-Test: Interesse exklusive MZ null. ....	73
Tabelle 11: Games-Howell-Test: Misserfolgsbefürchtung inklusive MZ null. ....	74
Tabelle 12: Tukey-Test: Herausforderung inklusive MZ null. ....	77
Tabelle 13: Modellfit-Werte MZ eins. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten. ....	89
Tabelle 14: Qualitatives Feedback MZ eins.....	90

Tabelle 15: Modellfit-Werte 2x2 Meter. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten. ....	92
Tabelle 16: Qualitatives Feedback 2x2 Meter. Zitate der Rückmeldungen. ....	92
Tabelle 17: Modellfit-Werte 4x4 Meter. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten. ....	93
Tabelle 18: Qualitatives Feedback 4x4 Meter. Zitate der Rückmeldungen. ....	93
Tabelle 19: Modellfit-Werte 6x6 Meter. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten. ....	94
Tabelle 20: Qualitatives Feedback 6x6 Meter. Zitate der Rückmeldungen. ....	94
Tabelle 21: Modellfit-Werte MZ drei. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten. ....	98
Tabelle 22: Qualitatives Feedback MZ drei. Zitate der Rückmeldungen. ....	98
Tabelle 23: Modellfit-Werte MZ vier. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten. ....	100
Tabelle 24: Qualitatives Feedback MZ vier. Zitate der Rückmeldungen. ....	100
Tabelle 25: Modellfit-Werte MZ fünf. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten. ....	102
Tabelle 26: Qualitatives Feedback MZ fünf. Zitate der Rückmeldungen. ....	102
Tabelle 27: Modellfit-Werte MZ sechs. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten. ....	104
Tabelle 28: Qualitatives Feedback MZ sechs. Zitate der Rückmeldungen. ....	104
Tabelle 29: Modellfit-Werte des respezifizierten Modells in MZ vier. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten. ....	118
Tabelle 30: Modellfit-Werte des respezifizierten Modells in MZ fünf. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten. ....	119
Tabelle 31: Modellfit-Werte des respezifizierten Modells in MZ sechs. In Klammern die Cut-Off Wertbereiche, die idealerweise erreicht werden sollten. ....	120



## **V. Anhang**

Dieser Arbeit sind die Erhebungsinstrumente, die Einordnung einer relevanten Abschlussarbeit sowie Erhebungsimpressionen angehängt.

### **Relevante Abschlussarbeit und Darstellung des Eigenanteils**

Wallrath, S. (2021): Konzeption einer Virtual Reality Lernumgebung zum Thema Kohlenstoffdioxidausgasung aus der Queich. Unveröffentlichte Masterarbeit. Universität Koblenz-Landau, Arbeitsgruppe Chemiedidaktik.

Die durchgeführte Abschlussarbeit wurde inhaltlich von mir betreut und entstand in enger Kooperation zu dieser Dissertation. In ihr entstanden die technischen Grundlagen der Lernstationen für die Unreal Engine 4. Diese Grundlagen wurden in diesem Dissertationsprojekt von mir inhaltlich sowie technisch weiterentwickelt, überarbeitet und angepasst.

## Fragebogenskalen

Nachfolgend werden die eingesetzten Fragebogenskalen gezeigt. Es ist ein PDF-Auszug aus LimeSurvey der aufgrund der Exportfunktion nicht der genauen Darstellung der digitalen Version von LimeSurvey entspricht, die von den Teilnehmenden ausgefüllt wurde. Der Fragebogen wurde für jeden Zyklus angepasst. Exemplarisch sind in diesem alle eingesetzten Skalen angefügt.



**Herzlich Willkommen zur Erhebung der "Virtuellen Exkursionen 2.0". Vielen Dank, dass du daran teilnimmst!**

**In dieser Umfrage wird dein Erlebnis in der Virtuellen Realität erhoben, um virtuelle Exkursionen für den Einsatz im Schulunterricht zu erforschen.**

**Damit unterstützt du mein Dissertationsvorhaben im Rahmen des Projekts Reallabor Queichland.**

**Das Reallabor Queichland ist ein gemeinsames Projekt des Zentrums für Bildung und Forschung an Außerschulischen Lernorten (ZentrAL), der AG Chemiesdidaktik des Instituts für naturwissenschaftliche Bildung und des Instituts für Mathematik (AG Mathematische Modellbildung) am Campus Landau der Universität Koblenz-Landau und wird durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert.**

**Die Angebote im Reallabor werden in Zusammenarbeit mit der Stadt Landau, lokalen Bildungseinrichtungen und Unternehmen, wissenschaftlichen Institutionen sowie interessierten Bürgerinnen und Bürgern entwickelt.**

### Teil A: Ausfüllhinweise

Bei den nachfolgenden Fragen handelt es sich nicht um eine Wissensabfrage! Uns interessiert deine ganz persönliche Meinung und Situation. Es ist wichtig, dass du alle Fragen alleine beantwortest und keine auslässt. Kannst du dich nicht entscheiden, kreuze die Antwortmöglichkeit an, die für dich am ehesten in Frage kommt.

Diese Umfrage kann zwischen 15-30 Minuten dauern.

### Teil B: Gruppe 1 FAM

Rheinberg et al. 2001

**B1. Wie ist deine aktuelle Motivation? Bitte beziehe Stellung zu folgenden Aussagen.**

	Trifft nicht zu.									Trifft zu.
Ich mag solche Aufgaben.	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich glaube, der Schwierigkeit dieser Aufgabe gewachsen zu sein.	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wahrscheinlich werde ich die Aufgabe nicht schaffen	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>





	Trifft nicht zu.							Trifft zu.
Bei der Aufgabe mag ich die Rolle des Wissenschaftlers, der neue Orte erkundet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich fühle mich unter Druck, bei der Aufgabe gut abschneiden zu müssen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Aufgabe ist eine richtige Herausforderung für mich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Nach dem Lesen der Instruktion erscheint mir die Aufgabe sehr interessant.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich bin sehr gespannt darauf, wie gut ich hier abschneiden werde.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich fürchte mich ein wenig davor, dass ich mich hier blamieren könnte.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich bin fest entschlossen, mich bei dieser Aufgabe voll anzustrengen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bei Aufgaben wie dieser brauche ich keine Belohnung, sie machen mir auch so viel Spaß.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Es ist mir etwas peinlich, hier zu versagen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich glaube, dass kann jeder schaffen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich glaube, ich schaffe diese Aufgabe nicht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wenn ich die Aufgabe schaffe, werde ich schon ein wenig stolz auf meine Tüchtigkeit sein.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wenn ich an die Aufgabe denke, bin ich etwas beunruhigt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Eine solche Aufgabe würde ich auch in meiner Freizeit bearbeiten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die konkreten Leistungsanforderungen hier lähmen mich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### Teil C: Gruppe 2 SPQ

MEC SPQ Vorderer et al. 2004 Wie war dein Erlebnis in der virtuellen Realität (VR)? Bitte beziehe Stellung zu folgenden Aussagen

#### C1.

	Ich stimme gar nicht zu.	Ich stimme eher nicht zu.	Teils-teils.	Ich stimme eher zu.	Ich stimme voll und ganz zu.
Ich konnte die in der VR dargestellte Anordnung der Räume gut nachvollziehen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich hatte eine genaue Vorstellung von der in der VR dargestellten räumlichen Umgebung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich konnte gut abschätzen, wie groß der dargestellte Raum war.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe jetzt noch ein plastisches Bild der räumlichen Umgebung im Kopf.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich hatte den Eindruck, dass ich selbst in der dargestellten Umgebung aktiv werden konnte.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich hatte das Gefühl, um die dargestellten Objekte herumgehen zu können.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



	Ich stimme gar nicht zu.	Ich stimme eher nicht zu.	Teils-teils.	Ich stimme eher zu.	Ich stimme voll und ganz zu.
Die dargestellten Gegenstände wirkten auf mich, als ob ich selbst etwas damit machen könnte.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Es kam mir so vor, als ob ich in der dargestellten Umgebung tun und lassen konnte, was ich wollte.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe mich darauf konzentriert, ob Unstimmigkeiten in der VR vorhanden sind.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe nicht besonders darauf geachtet, ob Fehler bzw. Widersprüche in der VR bestehen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe der VR Präsentation gegenüber einen kritischen Standpunkt eingenommen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Für mich war es nicht von Bedeutung, ob die VR Fehler bzw. Widersprüche enthält.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe meist an Dinge gedacht, die mit der VR etwas zu tun hatten.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe gründlich überlegt, inwiefern die dargestellten Dinge miteinander zu tun haben.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Das in der VR Dargestellte hat meine Gedanken angeregt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe darüber nachgedacht, ob das in der VR Dargestellte für mich von Nutzen sein kann.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wenn mir jemand einen Grundriss zeigt, kann ich mir den Raum gut vorstellen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Es fällt mir leicht mir einen Raum plastisch vor Augen zu führen, ohne darin zu sein.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Beim Lesen habe ich oft ein detailgetreues Bild der beschriebenen Umgebung vor Augen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Wenn mir jemand einen Raum schildert, ist es für mich meist sehr einfach, mir diesen klar vorzustellen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe meine Aufmerksamkeit auf die VR gerichtet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe mich auf die VR konzentriert.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die VR hat meine Sinne vereinnahmt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich habe mich der VR voll gewidmet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Es war, als ob sich mein eigentlicher Standort in die dargestellte Umgebung verlagert hätte.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich hatte das Gefühl, in der dargestellten Umgebung selbst körperlich anwesend zu sein.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Es kam mir vor, als ob ich wirklich am dargestellten Geschehen teilgenommen habe.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich hatte das Gefühl, in der dargestellten Umgebung vor Ort zu sein.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



## Teil D: Gruppe 2 SPQ DSI

D1.

	Ich stimme gar nicht zu.	Ich stimme eher nicht zu.	Teils-teils.	Ich stimme eher zu.	Ich stimme voll und ganz zu.
Am Thema VR bin ich generell Interessiert.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich fühle schon seit langer Zeit eine starke Neigung zum Thema VR.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich hatte schon eine Vorliebe für den Gegenstand VR, bevor ich damit zu tun hatte.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich liebe es einfach, mir Gedanken zum Thema VR zu machen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## Teil E: Gruppe 3 Bed

Wahrgenommene Bedienbarkeit - Venkatesh aus Olbrecht 2010

E1. **Wie ist die Benutzerfreundlichkeit der VR? Bitte beziehe Stellung zu folgenden Aussagen.**

	Stimme überhaupt nicht zu.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Stimme völlig zu.
Der Umgang mit dem System ist für mich klar und verständlich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Der Umgang mit dem System erfordert von mir keine große geistige Anstrengung.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich finde das System leicht zu bedienen.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich finde, das System macht ohne Probleme das, was ich möchte.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## Teil F: Gruppe 4 Realismus

German VR Realism Scale Poeschl & Doering 2013

F1. **Wie bewertest du den Realismus der VR? Bitte beziehe Stellung zu folgenden Aussagen.**

	Stimme gar nicht zu.	Stimme eher nicht zu.	Teils-Teils.	Stimme eher zu.	Stimme völlig zu.
Die Lichtreflexion im virtuellen Raum wirkte natürlich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Licht und Schatten im virtuellen Raum waren realistisch.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Der virtuelle Raum wirkte dreidimensional.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Farben im virtuellen Raum wirkten natürlich.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Proportionen im virtuellen Raum waren realistisch.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



**F2. Welchen Bewegungsradius hattest du?**

4x4 Meter

**F3. Hat dich das Kabel der VR Brille während du in der VR warst gestört oder behindert?**

Ja   
Nein

**Teil G: Gruppe 5 WLern**  
Wahrgenommene Lerneffektivität, Zhang 2017

**G1. Wie denkst du kann sich VR auf deinen Lernerfolg auswirken? Beziehe Stellung.**

	Stimme überhaupt nicht zu.							Stimme voll und ganz zu.
Ich bin mehr daran interessiert, die Themen zu erkunden.	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich erhalte viele sachliche Informationen zu den Themen.	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich erlange ein gutes Verständnis der grundlegenden Konzepte der Materialien.	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich lerne, die wichtigsten Aspekte der Themen zu erkennen.	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich bin interessiert, mehr zu erfahren.	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ich bin in der Lage, das Gelernte zusammenzufassen und Schlussfolgerungen zu ziehen.	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Lernaktivitäten sind sinnvoll.	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Was ich lerne, kann ich in einem realen Kontext anwenden.	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Teil H: Gruppe 7 VR**

**H1. Nimm Stellung zu folgenden Aussagen:**

	Stimme gar nicht zu.							Stimme voll und ganz zu.
Die Realitätsnähe der 3D-Bilder motiviert mich zum Lernen.	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Der fließende Wechsel der Bilder macht das Lernen motivierender und lehrreicher.	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Realitätsnähe der 3D-Bilder trägt zu meinem besseren Verständnis bei.	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Möglichkeit, die Ansicht der 3D-Objekte zu ändern, ermöglicht es mir, leichter zu lernen.	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Die Möglichkeit, die Ansicht der 3D-Objekte zu ändern, macht das Lernen motivierender und interessanter.	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	-----	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



	Stimme gar nicht zu.		Stimme voll und ganz zu.
Die Möglichkeit, die Objekte in der virtuellen Umgebung zu bearbeiten (z. B. drehen), macht das Lernen motivierender und interessanter.	□	□	□
Die Möglichkeit, die Objekte in Echtzeit zu bearbeiten, trägt dazu bei, mein Verständnis zu verbessern.	□	□	□

**H2. Ist dir etwas in der VR negativ aufgefallen?**

Ja

Nein

**H3. Bitte fasse in Stichpunkten zusammen, was dich gestört hat:**

**Teil I: Soziodemographie**

**I1. Um unsere wissenschaftliche Auswertung vornehmen zu können, möchten wir dich noch bitten uns dein Geschlecht und dein Geburtsjahr zu nennen.**

**Geschlecht:**

divers

weiblich

männlich

**I2. Geburtsjahr (z.B.: 1998):**



## Teil J: ID

ID generierung.

**J1. Damit wir bei der Auswertung feststellen können, ob du zweimal teilgenommen hast, bitten wir dich um eine anonymisierte aber individuelle Kennung. Trage hierfür die ersten zwei Buchstaben des eigenen Vornamen, des Vornamens der Mutter sowie des Vaters ein. Am Ende noch die ersten beiden Zahlen deines Geburtstags.**

**Beispiel:**

**Eigener Name: Sanem.**

**Name der Mutter: Magdalena.**

**Name des Vaters: Dimitri.**

**Geburtstag: 04.02.1997**

**Einzutragende ID: SaMaDi04**

## Teil K: Hinweise zum Datenschutz

Hinweise zum Datenschutz

Während der Studie wird als einzige persönliche Angabe ihr Geschlecht und Geburtsjahr gespeichert. Eine nachträgliche Zuordnung der Daten zu einer bestimmten Person ist ausschließlich mithilfe der freiwillig generierten ID möglich, die jedoch gesondert gespeichert wird. Die Daten sind gegen unbefugten Zugriff gesichert.

Weiterhin möchten wir Sie auf folgende Rechte bezüglich deiner personenbezogenen Daten hinweisen. Sie haben das Recht: • Auskunft (gemäß Art. 15 DS-GVO) zu erhalten, einschließlich unentgeltlicher Überlassung einer Kopie • ggf. deren Berichtigung (gemäß Art. 16 DS-GVO) zu verlangen • ggf. deren Löschung zu verlangen, solange dem keine Aufbewahrungspflichten (gemäß Art. 17 DS-GVO) entgegenstehen • die Einschränkung der Verarbeitung zu verlangen (gemäß Art. 18 DS-GVO) • die Daten einem anderen ohne Behinderung zu übermitteln (Datenübertragung gemäß Art. 20 DS-GVO) • Einwendung gegen die Nutzung für wissenschaftliche Zwecke (über die direkten Zwecke der Studie hinaus) zu erheben

Darüber hinaus weisen wir Sie auf das Beschwerderecht bei einer Datenschutz Aufsichtsbehörde hin. Die Kontaktdaten der zuständigen Datenschutz-Aufsichtsbehörde: Der Landesbeauftragte für den Datenschutz Rheinland-Pfalz Hintere Bleiche 34 55116 Mainz Postanschrift: Postfach 30 40 55020 Mainz Telefon +49 6131 2082449 Telefax +49 6131 2082497 E-Mail: poststelle@datenschutz.rlp.de Kontaktdaten des zuständigen Datenschutzbeauftragten, Campus Landau: Universität Koblenz-Landau, Datenschutzbeauftragte Dr. Susanne Weis, Campus Landau, Fortstr. 7, 76829 Landau, datenschutz@uni-landau.de



**Herzlichen Dank für Ihre Teilnahme!**

**Universität Koblenz-Landau**

**Marc Bastian Rieger**

**Fortstraße 7**

**76829 Landau**

**[rieger@uni-landau.de](mailto:rieger@uni-landau.de)**



**Sommerliche VR-Umgebung die aufgrund von Hardwarelimitierungen nicht in VR erlebbar war. Darstellung in der VR als auch realweltliche Vorlage.**





## VI. Lebenslauf

Name: Marc Bastian Rieger

Wohnort: [REDACTED]

Staatsangehörigkeit: Deutschland

E-Mail: m.rieger@rptu.de



### Berufliche Laufbahn

Mai 2021 – heute

#### **Echo Webentwicklung**

Alleiniger Gründer des Gewerbes "Echo Webentwicklung"  
Nebenberufliches Angebot von Dienstleistungen:

- Konzeption, Wartung und Programmierung von Webseiten/Web-Apps
- individuelle Codelösungen, AR + VR-Webinhalte, uvm.

<https://echowebentwicklung.de/>

August 2021 - August  
2024

#### **Universität Koblenz-Landau/RPTU**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Projekt "DigiKompASS"

Konzeption, Programmierung und Wartung von E-Klausuren mit dem Videoanalysetool ViviAn sowie die Weiterentwicklung und Erforschung der Analyseplattform

Konzeption von Integrations- und Entwicklungsstrategien für KI/ML

April 2022 - Januar 2023

#### **Universität Koblenz-Landau**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Projekt "MatheLiftSU2"

Entwicklung und Programmierung von Web-Lösungen für das Institut für Mathematik

Januar 2022 – Aug. 2022

#### **Universität Koblenz-Landau**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter

Projekt: BNEx

- Entwicklung, Wartung und Programmierung digitaler Inhalte
- Nov. 2019– April 2020 **Universität Koblenz-Landau**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Weiterqualifikation im Bereich der computerbasierten Lehre im Bereich VR- und AR Nutzung und Entwicklung sowie Durchführung eines Seminarkonzepts
- Nov. 2018 – Jan. 2022 **Universität Koblenz-Landau**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Mitarbeiter des Projekts "Reallabor Queichland"  
Forschung und Entwicklung im Bereich Reallabore, Citizen Science, Service Learning und Digitalisierung
- April 2016 – 2019 **Universität Koblenz-Landau**  
Studentische Hilfskraft  
Technische Entwicklung des Analysetools ViviAn
- Nov. 2018 – Nov. 2018 **Universität Koblenz-Landau**  
Studentische Hilfskraft  
Ausarbeitung von Fragebogenbasierten Erhebungen
- August 2016 - April 2018 **Universität Koblenz-Landau**  
Studentische Hilfskraft  
Zertifikatstudiengang Heterogenität und Mehrsprachigkeit  
Verwaltung und Erstellung digitalen Inhalten
- Juli 2017 – Dez. 2017 **Grafikdesign Rieger**  
Freiberufler  
Programmierung von Grafik-/Webdesigns für die Webpräsenzen der Ökosystemforschung Anlage Eußerthal der Universität Koblenz-Landau.

## **Ausbildung**

2019 – heute	Universität Koblenz-Landau/RPTU Doktorand bei Prof. Dr. Björn Risch
WS 2016 - WS 2018	Universität Koblenz-Landau Schwerpunkt: Lehramt Abschluss: Master of Education Deutsch und Erdkunde
WS 2012 - SS 2016	Universität Koblenz-Landau Schwerpunkt: Lehramt Abschluss: Bachelor of Education Deutsch und Erdkunde
2010	Helmholtz Gymnasium Karlsruhe Abitur