

Kumulative Dissertation

Erfassung und adaptive Förderung der mentalen Rotationsfähigkeit mittels virtueller Umgebungen

Vorgelegt von

Dipl.-Psych. Sunita Ariali, B.Sc.

aus Georgien

Von der Fakultät 10 Wirtschafts- und Sozialwissenschaften der Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines Doktors der

Philosophie (Dr. phil.) genehmigte Abhandlung

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. habil. Bernd Zinn

Mitberichterin: Jun.-Prof. Dr. rer. nat. Maria Wirzberger

Tag der mündlichen Prüfung: 04.11.2021

Institut für Erziehungswissenschaft

Abteilung Berufspädagogik mit Schwerpunkt Technikdidaktik (BPT)

der Universität Stuttgart

2021

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen ganz herzlich bedanken, die mir durch ihre Unterstützung die Erstellung dieser Arbeit ermöglicht haben:

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Bernd Zinn für die Betreuung dieser Arbeit, für seine stets verständnisvollen Hilfestellungen und für die vielen Anregungen, die er mir gegeben hat. Die zahlreichen Gespräche auf intellektueller und persönlicher Ebene habe ich stets ermutigend und motivierend empfunden.

Mein großer Dank gilt auch Frau Jun.-Prof. Dr. Maria Wirzberger für ihre wertvolle Unterstützung und wissenschaftliche Betreuung als Zweitgutachterin.

Zudem möchte ich mich ganz herzlich an meiner ehemaligen Kollegin Carolin Pletz für ihre tatkräftige Unterstützung bedanken. Die mehrfache Durchsicht dieser Arbeit, ihre kritischen Anmerkungen, ihre differenzierten Kommentare sowie die hilfreichen Diskussionen mit ihr, vor allem aber ihre moralische und menschliche Unterstützung, haben mir Kraft und Mut gegeben, meine Dissertation zu vollenden und abzuschließen. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen Dr. Matthias Wyrwal, Qi Guo, Evelyn Hoffahrt, Katharina Kunz, Marcus Brändle und allen anderen, die mir während meiner Promotion stets unterstützend zur Seite standen.

Tief verbunden und dankbar bin ich meinem Lebensgefährten, Dr. Martin Hirsch, für seine unglaublich hilfreiche Unterstützung und sein Verständnis bei der Anfertigung dieser Doktorarbeit.

Das größte Dank zum Abschluss gebührt meine Tochter, Marlene Hirsch, die durch ihre Geduld und Mitgefühl in ihren ersten Lebensmonaten mir die Fertigstellung dieser Arbeit ermöglichte.

Zusammenfassung

Zur Unterstützung von Lern- und Arbeitsprozessen werden digitale Medien eingesetzt (Pittich & Tenberg, 2020; Zinn, 2017). Eine innovative Technologie ist die Virtual Reality (VR)-Technologie, mit deren Einsatz multiple Potenziale verbunden werden (Zinn, 2019). Unter VR werden computergenerierte Welten verstanden, die durch die Einbindung natürlicher Benutzeroberflächen das Gefühl vermitteln können, sich tatsächlich in der simulierten Umgebung zu befinden. VR wurde bereits in verschiedene Anwendungsbereiche integriert – mit dem Ziel, Bildung, Lehre und Training effizienter zu gestalten. Bislang gibt es jedoch wenige empirische Belege für den Nutzen von VR-Technologien in Bildungskontexten. Für die interdisziplinäre Forschung in Informatik, Psychologie und Erziehungswissenschaft ist es deshalb von zentraler Bedeutung, diese Potenziale empirisch zu belegen. Die vorliegende Arbeit stellt einen Ansatz hierfür dar, indem VR-basierte Test- und Trainingsmöglichkeiten für die mentale Rotationsfähigkeit entwickelt und erprobt werden. Die mentale Rotationsfähigkeit (engl. Mental Rotation Ability, MRA) ist ein Teil des räumlichen Vorstellungsvermögens und beschreibt die Fähigkeit, 2-D- oder 3-D-Figuren im Geiste zu drehen. Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, empirische Erkenntnisse über die Erfassung und die optimale Förderung der MRA mittels VR-Technologie zu gewinnen. Hierzu wurden drei experimentelle Studien durchgeführt.

In der ersten Studie dieser Arbeit wurde die MRA mit dreidimensionalen mentalen Rotationstests (3-D-MRT) erfasst, welche mithilfe vollimmersiver, teilimmersiver und nichtimmersiver VR-Technologien realisiert wurden, um verschiedene Immersionsgrade miteinander zu vergleichen und relevante Einflussfaktoren bei der Erfassung der MRA zu identifizieren. Insbesondere die fluide Intelligenz und das Geschlecht gelten in der langjährigen Forschung zur MRA als wichtige Einflussfaktoren und wurden deshalb in der ersten Studie untersucht. Die zweite Studie erfolgte, um ein virtuelles Testinstrument zur Erfassung der MRA zu entwickeln, erste Erkenntnisse über die Effektivität des virtuellen Trainings zu gewinnen und für das adaptive Design des virtuellen Trainings relevante Informationen zu erhalten. In diesem Zusammenhang wurde untersucht, inwieweit die Schwierigkeit von virtuellen Testaufgaben mit der Komplexität der darin enthaltenen Figuren zusammenhängt. Dabei wurde ausschließlich die vollimmersive VR-Technologie verwendet. In der dritten Studie, die auf der ersten und zweiten Studie aufbaute und

ebenfalls nur vollimmersive Technologie nutzte, wurde ein adaptives, VR-basiertes Training zur Förderung der MRA erprobt. Um die Wirksamkeit der adaptiven Trainingsumgebung zu evaluieren, wurde diese mit einer adäquaten randomisierten Umgebung verglichen. Darüber hinaus wurden mögliche Geschlechtsunterschiede sowie die kognitive Belastung der Personen und deren Einfluss auf die Trainingsergebnisse untersucht.

Die Ergebnisse der Studie 1 weisen auf einen partiellen Einfluss der Immersivität auf die Leistung im 3-D-MRT hin: Während sich die vollimmersive Bedingung nicht von der nichtimmersiven Bedingung unterscheidet, werden in der teilimmersiven Bedingung höhere Testwerte erzielt als in der nichtimmersiven Bedingung. Sowohl die fluide Intelligenz als auch das Geschlecht erweisen sich dabei als wichtige Einflussfaktoren. Studie 2 liefert ein valides Testinstrument zur Messung der mentalen Rotationsfähigkeit und zeigt, dass sich die MRA nach der Auseinandersetzung mit den dreidimensionalen Würfelfiguren verbessert. Ein weiteres zentrales Ergebnis von Studie 2 ist die signifikante Korrelation der Aufgabenschwierigkeit mit der Komplexität der enthaltenen Würfelfiguren, was in Studie 3 zur adaptiven Gestaltung des VR-Trainings herangezogen wurde. Studie 3 belegt den Vorteil des adaptiven Trainings gegenüber dem randomisierten Training und deutet gleichzeitig darauf hin, dass das Geschlecht dabei eine entscheidende Rolle spielt. Hinsichtlich der kognitiven Belastung wurden keine Unterschiede zwischen den adaptiven und randomisierten Bedingungen gefunden.

Die Ergebnisse der durchgeführten Studien eröffnen neue Einsichten in die Fördermöglichkeiten der mentalen Rotationsfähigkeit und liefern empirisch fundierte Erkenntnisse über den Einsatz von VR-Technologie in adaptiven Trainingskontexten. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse könnten neue Ansatzpunkte für die Entwicklung von VR-basiertem adaptivem Training abgeleitet und die Forschung in diesem Bereich vorangetrieben werden.

Summary

Digital media is used to support learning and work processes (Pittich & Tenberg, 2020; Zinn, 2017). One innovative technology is virtual reality (VR), where the use of combines several potentials (Zinn, 2019). VR refers to computer-generated worlds that can convey the feeling of actually being in the simulated environment by incorporating natural user interfaces. VR has already been integrated into various application areas – with the goal of making education, teaching and training more efficient. To date, however, there is little empirical evidence of the benefits of VR technologies in educational contexts. It is therefore of central importance for interdisciplinary research in computer science, psychology, and educational science to provide empirical evidence of these potentials. This work presents an approach to this by developing and testing VR-based testing and training options for mental rotation ability. Mental Rotation Ability (MRA) is a part of the spatial imagination and describes the ability to rotate 2D or 3D figures in the mind. The main goal of this work is to generate empirical findings on the assessment and optimal support of MRA using VR technology. For this purpose, three experimental studies were conducted.

In the first study of this work, MRA was assessed with three-dimensional mental rotation tests (3-D MRT), which were realized using fully immersive, partially immersive, and non-immersive VR technologies in order to compare different degrees of immersion and to identify relevant influencing factors in the assessment of MRA. In particular, fluid intelligence and gender are considered as important influencing factors in long-standing research on MRA and were therefore investigated in the first study. The second study was designed to develop a virtual test instrument for the assessment of MRA, to gain first insights into the effectiveness of virtual training, and to obtain relevant information for the adaptive design of virtual training. In this context, it was examined to what extent the difficulty of virtual test items is related to the complexity of the figures they contain. Only fully immersive VR technology was used. In the third study, which was based on the first and second studies and also used only fully immersive technology, adaptive VR-based training for enhancing MRA was tested. To evaluate the effectiveness of the adaptive training environment, it was compared with the adequate randomized environment. In addition, possible gender differences as well as the cognitive load of the subjects and its influence on the training results were investigated.

The results of Study 1 indicate a partial influence of immersivity on performance in 3-D MRT: While the fully immersive condition does not differ from the non-immersive condition, higher test scores are obtained in the partially immersive condition than in the non-immersive condition. Both fluid intelligence and gender proved to be important influencing factors. Study 2 provides a valid test instrument for measuring mental rotation ability and shows that MRA improves after exposure to the three-dimensional cube figures. Another key finding of Study 2 is the significant correlation of task difficulty with the complexity of the included cube figures, which was used to adaptively design VR training in Study 3. Study 3 demonstrates the advantage of adaptive training over randomized training while also showing that gender plays a critical role in this process. No differences were found between the adaptive and randomized conditions with regard to cognitive load.

The results of the conducted studies provide new insights into the possibilities of supporting mental rotation ability and provide empirically based knowledge about the use of VR technology in adaptive training contexts. Based on these findings, new approaches for the development of VR-based adaptive training could be derived and research in this area could be advanced.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	3
Zusammenfassung	4
Summary.....	6
Inhaltsverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	11
1 Einleitung	12
1.2 Theoretischer Hintergrund und Forschungsstand	15
1.2.1 Theoretische Grundlagen und Forschungsstand zu virtuellen Lernumgebungen	15
1.2.2 Theoretische Grundlagen und Forschungsstand zur mentalen Rotationsfähigkeit.....	30
1.2.3 Theoretische Grundlagen und Forschungsstand zu adaptiven Lern- und Trainingsumgebungen	36
1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen der Dissertation.....	41
1.4 Entwicklung von VR-basierten Versuchsumgebungen	44
1.5 Verknüpfung der Veröffentlichungen.....	47
2 Publierte Originalarbeiten	52
2.1 Publikation 1	53
1 Einleitung	54
2 Theoretischer Hintergrund und Forschungsstand	56
2.1 VR-Technologie.....	56
2.2 Einordnung der mentalen Rotationsfähigkeit	58
3 Hypothesen.....	62
4 Methode	64
4.1 Untersuchungsanlage	64
4.2 Stichprobe	65
4.3 Instrumente	66
4.3.1 <i>Mentaler Rotationstest von Vanderberg und Kuse (1978)</i>	66
4.3.2 <i>Culture Fair Test (CFT 20-R) von Weiß (2006)</i>	66
4.3.3 <i>Questionnaire for the subjective Consequences of intuitive Use (QUESI)</i> <i>von Naumann und Hurtienne (2010)</i>	67
4.3.4 <i>Dreidimensionaler mentaler Rotationstest (3-D-MRT)</i>	67
4.4 Durchführung	68
5 Ergebnisse	69
5.1 Mentale Rotationsfähigkeit (Paper-Pencil).....	69
5.2 Fluide Intelligenz	70

5.3 Subjektive Konsequenzen intuitiver Benutzung	70
5.4 Mentale Rotationsfähigkeit (3-D-MRT)	70
5.5 Regressionsanalyse	73
6 Zusammenfassung und Diskussion	76
7 Literatur	79
2.2 Publikation 2	83
1 Introduction	84
2 Theoretical and empirical background	86
2.1 VR-Technology	86
2.2 Mental rotation ability	89
3 Research questions	92
4 Method	93
4.1 Participants	93
4.2 Design	93
4.3 Materials	94
4.3.1 Technology	94
4.3.2 Mental Rotation Test	94
4.3.3 VRSR system	95
4.3.4 Procedure	97
5 Results	99
6 Discussion	101
7 Summary	103
References	104
2.3 Publikation 3	108
1 Introduction	108
1.1 VR-Technology	110
1.2 Mental rotation ability	112
1.3 Adaptive training environments	114
2 Current study	115
3 Method	116
3.1 Participants	116
3.2 Design	116
3.3 Materials	117
3.4 Procedure	119
4 Results	120
5 Discussion	123
References	126
3 Diskussion der Gesamtergebnisse und Schlussfolgerungen	130
3.1 Zusammenfassung der Ergebnisse	130
3.1.1 Einfluss des Geschlechts auf die mentale Rotationsfähigkeit in virtuellen Räumen	135
3.1.2 Adaptives Training	136

3.1.3	Wirkungsmechanismen des virtuellen Rotationstrainings.....	140
3.1.4	Gegenüberstellung verschiedener MRT-Varianten	142
3.2	Limitationen	144
3.3	Schlussfolgerungen	148
3.4	Fazit und Ausblick	150
4	Literaturverzeichnis.....	153
	Lebenslauf	162

Abkürzungsverzeichnis

ANN	Artificial Neural Network
ANOVA	Analysis of variance
CLT	Cognitive Load Theory
EAP/PV	Expected a posteriori/plausible value
EDA	Elektrodermale Aktivität
EEG	Elektroenzephalographie
FF	Forschungsfrage
HMD	Head-Mounted Display
HRV	Herzfrequenzvariabilität
IQ	Intelligenzquotient
IRT	Item Response Theory
MINT	Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik
MRT	Mentaler Rotationstest
MRA	Mental Rotation Ability (Mentale Rotationsfähigkeit)
NI	Nichtimmersiv
NUI	Natural User Interface
PC	Personal Computer
RV	Räumliches Vorstellungsvermögen
SVM	Support-Vektor-Maschinen
TI	Teilimmersiv
VI	Vollimmersiv
VMRT	Virtual Mental Rotation Test
VRSR	Virtual Reality Spatial Rotation
VR	Virtual Reality
WLE	Weighted Likelihood Estimates
WMNSQ	Weighted root mean square value
3-D-MRT	Dreidimensionaler mentaler Rotationstest
6DoF	6 Degrees of Freedom

1 Einleitung

Die fortschreitende Digitalisierung verändert Lern- und Arbeitsumgebungen mehr denn je. Es werden neue technologische Lösungen entwickelt, um Prozesse zu beschleunigen, körperlich und geistig herausfordernde Tätigkeiten zu unterstützen, Arbeitsabläufe zu automatisieren und die Wertschöpfungsketten zu optimieren. Auch virtuelle Realität (VR) zählt zu den modernen Technologien und wird sowohl für die Arbeitswelt als auch im Kontext von Lehr-Lern-Arrangements im Allgemeinen mit entsprechenden Vorteilen verbunden (Zinn & Ariali, 2020). Forschende und Organisationen verschiedener Fachrichtungen setzen sich intensiv mit VR-Technologien auseinander und versuchen, dem Klassenzimmer sowohl beim Lehren als auch beim Lernen eine zusätzliche Dimension zu verleihen (Radianti et al., 2020). Die Bedeutung der Technologie im Bildungssektor wird teilweise so hoch bewertet, dass sie als das Lernhilfsmittel des 21. Jahrhunderts beschrieben wird (Rogers, 2019).

Die Entwicklung der ersten Ideen zur Erstellung und Erkundung von VR-basierten künstlichen Welten liegt mehrere Jahrzehnte zurück (Sutherland, 1965), die Umsetzung dieser Ideen war jedoch aufgrund der unzureichenden technologischen Entwicklung stets begrenzt. Inzwischen bietet die steigende Computerleistung den VR-Entwicklern immer mehr Möglichkeiten, die vielfältigen Visionen, die mit VR verbunden sind, zu realisieren. Neueste Entwicklungen in der Visualisierung und Interaktion machen VR für Praxis und Wissenschaft zunehmend attraktiv. Die neuesten Head-Mounted Displays (HMDs) ermöglichen den Nutzerinnen und den Nutzer ein hohes Maß an Immersion und können ihnen das Gefühl geben, sich selbst tatsächlich in der Lern- oder Aufgabenumgebung zu befinden. Darüber hinaus bieten die aktuellen Erweiterungen der VR-Technologie auch Interaktionsmöglichkeiten mit der virtuellen Welt, welche die Immersion noch weiter verstärken kann.

Aufgrund der zunehmenden Aufmerksamkeit für VR-basierte Gestaltungsmöglichkeiten im Bildungssektor ist es wichtig, die Bereiche im Bildungswesen zu identifizieren, in denen VR-Technologie für Lernprozesse förderlich eingesetzt werden kann, exemplarische Anwendungsfälle bereitzustellen und empirisch zu prüfen. Aufgrund der Heterogenität der Lern- und Arbeitsbereiche, die sich in virtuellen Welten abbilden lassen, erscheint diese Aufgabe nicht trivial. Dennoch gibt es Hinweise darauf, dass virtuelle Um-

gebungen für bestimmte Arten von Lerninhalten besonders vorteilhaft sein können. Insbesondere Trainings zur Förderung räumlicher Fähigkeiten werden im Zusammenhang mit dem Einsatz von VR-basierten Systemen häufig angesprochen (Dünser et al., 2006), da die Bedeutung dieser Fähigkeiten in unserem technologiegeprägten Alltag ebenfalls zunimmt (González-Franco et al., 2010; Lane et al., 2019; Uttal & Cohen, 2012). So werden beispielsweise für die mentale Repräsentation von technologievermittelten Inhalten räumliche Fähigkeiten benötigt. Auch im täglichen Leben wird ihnen eine große Bedeutung beigemessen: Sei es das Erkennen von Objekten und Orten, die Verwendung von Werkzeugen oder die Durchführung konstruktiver Tätigkeiten – für all diese Tätigkeitsbereiche sind räumliche Fähigkeiten erforderlich. Für die schulischen und beruflichen Anforderungen wird die große Bedeutung der räumlichen Fähigkeiten – insbesondere der mentalen Rotationsfähigkeit – ebenso betont (Verdine et al., 2017; Wai & Uttal, 2018). Die mentale Rotationsfähigkeit ist einer der drei Faktoren des räumlichen Vorstellungsvermögens und beschreibt die Fähigkeit sich vorzustellen, wie Objekte aus einer anderen Perspektive aussehen. Aufgrund seiner einfachen Messbarkeit mittels zuverlässiger mentaler Rotationstests (Caissie et al., 2009; Peters et al., 1995) und seiner nachweislichen Relevanz für MINT-Fächer (Città et al., 2019; Stieff et al., 2018; Uttal & Cohen, 2012) hat der MRA bislang in Forschung und Praxis hohe Aufmerksamkeit auf sich gezogen.

Die ersten Ansätze zur Messung der MRA stammen von Shepard und Metzler (1971). Im ursprünglichen mentalen Rotationstest (MRT) wiesen die Autoren die Testpersonen an, so schnell und so genau wie möglich zu entscheiden, ob zwei im Raum gedrehte Würfel­figuren identisch sind oder ob eine Würfel­figur eine gespiegelte Version der anderen dar­stellt. Seither wurden zahlreiche Studien mit verschiedenen Varianten von MRTs ver­öffentlicht. In der Literatur werden insbesondere geschlechtsspezifische Unterschiede dis­kutiert, die im mentalen Rotationstest konsistent mit großen Effektgrößen auftreten (Voyer, 2011; Voyer et al., 1995, 2020). Daher wird die mentale Rotation oft als Beispiel für eine kognitive Aufgabe gesehen, bei der Männer durchweg besser abschneiden als Frauen. Die Erklärungsansätze für Geschlechtsunterschiede sind vielfältig und stützen sich sowohl auf biologische als auch auf umweltbedingte Ursachen. Unter anderem wer­den frühe räumliche Erfahrungen mit besseren räumlichen Fähigkeiten in Verbindung gebracht (Baenninger & Newcombe, 1989; Baykal et al., 2018; Lockman et al., 2018): Jungen dürfen früher als Mädchen die Umwelt selbst erkunden, sie spielen mehr mit „ge­ometrischen“ Spielsachen und nehmen häufiger an Sport- und Freizeitaktivitäten teil, bei

denen sie räumliche Erfahrungen sammeln können. Unter Berücksichtigung dieser Annahme könnte eine Übung mit geeigneten Mitteln den Mädchen die Möglichkeit geben, adäquate Raumerfahrungen zu sammeln und bestehende Geschlechterunterschiede zu verringern. Tatsächlich gibt es in der Literatur bereits einige Hinweise darauf, dass manuelles oder computergestütztes Training die Geschlechterunterschiede in der mentalen Rotationsfähigkeit reduzieren kann (Liu et al., 2020; Rizzo et al., 2001; Wiedenbauer & Jansen-Osmann, 2008).

Die VR-Technologie eröffnet hierbei neue Gestaltungsmöglichkeiten für Test- und Trainingsumgebungen, insbesondere weil sie eine Vielzahl von Darstellungs- und Interaktionsformen bietet. Darüber hinaus könnte eine adaptive Gestaltung der virtuellen Trainingsumgebung die Effizienz des Trainings steigern, indem die Komplexität der Aufgaben für Personen mit niedrigen Fähigkeiten reduziert wird. Auf diese Weise gestaltete virtuelle Umgebungen würden Personen mit geringen räumlichen Fähigkeiten die Möglichkeit bieten, sich mit den mentalen und manuellen Drehungen der dreidimensionalen Figuren auseinanderzusetzen, um ihre Fähigkeiten zu verbessern. Mit der zunehmenden Modifikation der mentalen Rotationstests stellen sich jedoch vielfältige Fragen, so unter anderem:

- (1) Wie kann die MRA valide und reliabel in eine VR-Umgebung gemessen werden?
- (2) Wie muss ein entsprechendes Training gestaltet sein und welche VR-Technologie ist förderlich für eine Intervention?

1.2 Theoretischer Hintergrund und Forschungsstand

1.2.1 Theoretische Grundlagen und Forschungsstand zu virtuellen Lernumgebungen

VR-Technologien werden als das Lernwerkzeug des 21. Jahrhunderts für Lern- und Trainingszwecke benannt (Radianti et al., 2020). Die Frage, ob VR wirklich das Potenzial besitzt, die unterrichtliche Praxis zu revolutionieren, ist jedoch immer noch umstritten. Das Pro-Argument ist, dass VR für simulationsbasiertes Training eingesetzt werden kann, bei dem die Lernenden neue Fähigkeiten in einer nachgebildeten Umgebung üben können. Eine solche Umgebung bietet Zugang zur Interaktion mit teuren oder weit entfernten Räumen und erlaubt Fehler, Korrekturen und Wiederholungen. Allerdings ist eine systematische Begleitforschung beim Einsatz von VR-Technologie dringend notwendig, um die fördernden und hemmenden Aspekte sowie die Wirkung ihres Einsatzes zu identifizieren (Zinn & Ariali, 2020).

Den Forschungsschwerpunkten der VR-Technologie lassen sich drei verschiedene Ebenen zuordnen (Bente et al., 2002): (1) auf der Makroebene stehen die für den Einsatz der Technologie relevanten gesellschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen im Vordergrund, (2) auf der Mesoebene sind die Auswirkungen der Technologie auf Gruppen- und Organisationsstrukturen relevant und (3) die Mikroebene befasst sich mit den psychologischen Aspekten des Technologieeinsatzes. Diese Ebene umfasst allgemeine psychologische Fragen wie Wahrnehmung, Informationsverarbeitung und Gedächtnis sowie pädagogisch-psychologische Fragen, die sich auf die strukturelle Erklärung des Lehrens und Lernens mit VR-Technologie beziehen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die VR-Technologie aus pädagogisch-psychologischer Sicht und somit auf der Mikroebene betrachtet.

Im Verlauf dieses Kapitels wird nach der Definition des Begriffs „VR“ die historische Entwicklung diskutiert und verschiedene Typen dieser Technologie beschrieben. Anschließend werden die Theorien und Ansätze vorgestellt, die eine Grundlage für den Einsatz der VR-Technologie im Bildungsbereich bilden, und schließlich die Anwendungsmöglichkeiten der VR-Technologie, insbesondere im Bildungsbereich, erläutert.

Definition

Unter dem Begriff „Virtuelle Realitäten“ (VR) werden gänzlich computergenerierte Welten verstanden, die von Menschen als Simulationen der Realität wahrgenommen werden, möglichst viele Sinnesmodalitäten ansprechen und sich mithilfe von Eingabegeräten (mit)gestalten und verändern lassen (Buchner & Aretz, 2019). VR ermöglicht eine besondere Art der Mensch-Maschine-Interaktion, indem sie durch künstliche oder zunehmend auch natürliche Nutzerschnittstellen (engl. Natural User Interfaces, NUI) angereichert wird. Durch den Einsatz von NUIs wird der Nutzerin bzw. dem Nutzer eine realitätsnahe Navigation in VR und Interaktion mit virtuellen Objekten ermöglicht um dadurch eine authentischere Erfahrung zu vermitteln. Eine wichtige natürliche Nutzerschnittstelle der VR-Technologie ist das Head-Mounted Display (HMD), die so genannte „VR-Brille“. Bei der VR-Brille handelt es sich um ein komplett geschlossenes Gehäuse mit asphärischen Linsen, die am Kopf der Nutzerin oder des Nutzers so befestigt wird, dass die Augen mit den Linsen verdeckt sind. Durch die Stereoskopie wird eine dreidimensionale Wahrnehmung der virtuellen Realität ermöglicht (Bleser, 2017). Darüber hinaus existieren weitere NUIs (vgl. Datenhandschuh, Tracking), durch die sich virtuelle Welten noch realistischer Wahrnehmen lassen.

Geschichtliche Entwicklung der VR-Technologie

Erst in den letzten Jahren hat VR begonnen, verschiedene Anwendungsfelder zu erobern, doch die Geschichte virtueller Umgebungen ist überraschenderweise ziemlich lang. Noch bevor es die ersten Computer gab, existierten Ideen zu künstlichen Realitäten. Im Jahr 1934 beschrieb Weinbaum ein auf Brillen basierendes System mit holografischen Aufnahmen von fiktiven Ereignissen (Korgel, 2017). Im Jahr 1965 veröffentlichte Ivan Sutherland sein Essay mit dem Titel „The Ultimate Display“, in dem er die ersten Visionen über VR-Umgebungen beschrieb. Er beschrieb z.B. ein Display, das mit einem Computer verbunden ist und uns die Möglichkeit bietet, künstliche Welten zu betreten: *„The ultimate display would, of course, be a room within which the computer can control the existence of matter. A chair displayed in such a room would be good enough to sit in. Handcuffs displayed in such a room would be confining, and a bullet displayed in such a room would be fatal. With appropriate programming such a display could literally be the Wonderland into which Alice walked.“* (Sutherland, 1965)

Neben seinen Visionen regte Sutherland (1965) eine Reihe von technologischen Entwicklungen an, die dreidimensionale Interaktionen unterstützen, indem sie Informationen

nicht nur über die Augen, sondern auch über Ohren, Nase, Mund und Hände vermitteln. Sutherlands Arbeit war ein zentraler Grundstein für die VR-Entwicklung. Seine Visionen treiben noch bis heute verschiedene Forschungsfelder zur VR-Technologie an. Sutherland versuchte sogar, seine Ideen selbst zu verwirklichen und baute das erste 3-D-HMD. Da die technischen Möglichkeiten in den 60er-Jahren jedoch noch begrenzt waren, blieb Sutherlands Ideenumsetzung begrenzt.

Der Begriff „Virtual Reality“ wurde Mitte der 80er-Jahre von Jaron Lanier geprägt, um die damals aktuellen technischen Entwicklungen „virtual Worlds“, „virtual Cockpits“ und „virtual Workstations“ in einem Begriff zu vereinen (Bente et al., 2002). In dieser Zeit entwickelte die NASA eine Virtual-Reality-Workstation namens VIEW, die bereits Datenhandschuhe zur Interaktion mit virtuellen Objekten umfasste (Korgel, 2017).

In den 90er-Jahren erschienen die ersten Virtual-Reality-Headsets auf dem Markt, welche für verschiedene Zwecke bestimmt waren (Korgel, 2017): Es erschienen beispielsweise Anwendungen wie Flugsimulatoren und Spielsysteme zur Konstruktion und zum Design von Fahrzeugen, Medizinische Anwendungen und Anwendungen zur Visualisierung von Datenbanken. Trotz der anfänglichen Begeisterung scheiterten alle VR-Projekte relativ schnell. Die Gründe waren einerseits weiterhin hohe Anschaffungskosten und andererseits nicht ausreichend fortgeschrittene technische Möglichkeiten, vor allem im Bereich der Auflösung und Bildwiederholungsrate, zur Simulation der Realität. Im Jahr 2012 entwarf der Gründer der Firma „Oculus VR“ Palmer Luckey einen ersten Prototyp der „Oculus Rift“. Anfang 2015 stellte der Hardwarehersteller HTC in Verbund mit dem Steam-Betreiber Valve ihre eigene VR, die HTC VIVE, vor. Weitere Hersteller, insbesondere im Unterhaltungssektor, sind mit unterschiedlich leistungsfähigen HMDs auf dem Markt vertreten (z.B. Playstation VR).

Vielfalt der VR-Technologie

VR-Systeme können je nach virtueller Umgebung (z.B. Desktop, Brillen und Handschuhe, Großbildschirm) und Art der Mensch-Maschine-Schnittstellen grundsätzlich in drei verschiedene Kategorien, in vollimmersive, teilimmersive und nichtimmersive VR klassifiziert werden. Immersion beschreibt dabei die Einbindung einer Nutzerin bzw. eines Nutzers in eine virtuelle Umgebung, in der ihre bzw. seine Wahrnehmungen und die reale Welt oft nicht mehr miteinander verbunden sind, sodass sie bzw. er sich stattdessen in einer künstlichen Welt anwesend fühlt (Freina & Ott, 2015).

Das Gefühl der Immersion wird in voll- und teilimmersiven virtuellen Umgebungen dadurch gewährleistet, dass die Betrachtung der Umgebung für die Nutzerin bzw. den Nutzer aus der egozentrischen Perspektive möglich wird, was einer realitätsnahen Wahrnehmung der Umgebung und ihrer Objekte entspricht (Dede, 2009). Die Bewegungsmöglichkeit in vollimmersiven VR erlaubt zusätzlich die Wahrnehmung des Raumes und der Objekte aus unterschiedlichen Blickwinkeln und kann so dazu beitragen, die Verarbeitung räumlicher Informationen zu erleichtern.

Aufgrund technologischer Einschränkungen kann in den heutigen VR-Umgebungen ein Immersionsgefühl bislang nur begrenzt vermittelt werden (Velev & Zlateva, 2017). Es wird jedoch erwartet, dass diese Beschränkungen im Laufe der Zeit durch den Einsatz von leistungsfähigeren und kostengünstigeren Prozessor- und Bildverarbeitungstechnologien überwunden werden können (Gandhi & Pate, 2018).

Dennoch wird die in dieser Hinsicht zur Verfügung stehende Technologie, bei der allgemein die Immersion am besten unterstützt werden kann, im Folgenden als vollimmersiv bezeichnet. Vollimmersive Umgebungen zeichnen sich durch die Verwendung natürlicher Benutzerschnittstellen (u. a. HMD, Tracking) aus. Dadurch kann die Nutzerin bzw. der Nutzer mit virtuellen 3-D-Objekten auf eine natürliche Weise interagieren, Handlungen vornehmen und sich im virtuellen Raum bewegen. Da die Position der Nutzerin bzw. des Nutzers im Raum ständig erfasst wird, ist es möglich, sich in einer egozentrischen Perspektive in der virtuellen Umgebung fortzubewegen und diese visuell und auditiv zu erforschen (Korgel, 2017). Der Eigenschaft der vollimmersiven VR, frei in Raum zu bewegen, wird auch als 6DoF (6 Degrees of Freedom) bezeichnet. Im Gegensatz zu 3DoF-HMDs, die nur Rotationsbewegungen um die X-, Y- und Z-Achse erlauben, erlauben 6DoF-HMDs Translationsbewegungen um diese Achsen, wodurch der Eindruck entsteht, sich vorwärts, rückwärts, rechts oder links bewegen zu können. Zu den 6DoF-HMDs gehört die VR-Brille von HTC VIVE. Die HTC VIVE ist ein kombiniertes System aus Tracking und HMD. Das HMD ist dabei über Kabel oder per WLAN mit einem PC verbunden, in dem die VR-Anwendung läuft. Die beiden Controller sind kabellos. HTC VIVE nutzt ein auf der Lighthouse-Technologie basierendes optisches Trackingsystem, bei dem zwei Basisstationen an gegenüberliegenden Seiten des Raums platziert werden (Hagen, 2017). Mithilfe von integrierten Infrarot-LEDs und zwei Lasern, jeweils einer für die vertikale und horizontale Achse, lässt sich durch die Basisstationen eine Fläche von 5 x 5 Metern abdecken, auf der sich die Nutzerin bzw. der Nutzer bewegen kann. Um die Position und Rotation der Nutzerin bzw. des Nutzers zu registrieren, werden sowohl das

HMD als auch die zwei Controller, jeweils einer pro Hand, ausgewertet. Über die Controller können die Nutzerinnen und die Nutzer mit den virtuellen 3-D-Objekten interagieren, Handlungen vornehmen und sich im virtuellen Raum bewegen. Es ist möglich, in der virtuellen Umgebung umherzugehen, diese visuell und auditiv zu analysieren sowie 3-D-Objekte interaktiv zu manipulieren (Korgel, 2017).

Die Forscherinnen und Forscher gehen oft davon aus, dass mehr Immersion einen positiven Einfluss auf die Lernergebnisse hat. Beispielsweise stellten Loup et al. (2016) mehr Engagement bei den Lernenden mit HMD fest (Loup et al., 2016). Reiners et al. (2014) beobachteten, dass ihre Studienteilnehmenden die immersiven VR-Simulationen „ernster nahmen“ (d. h., sie versuchten es zu vermeiden, gegen Gegenstände zu laufen und gingen mit größerer Vorsicht mit gefährlichen Situationen um), als die nichtimmersiven (Reiners et al., 2014). Darüber hinaus fand Alhalabi (2016) beim Vergleich von drei VR-Systemen heraus, dass die Studienteilnehmenden im immersivsten System freiwillig mehr Zeit für die Lernaufgabe aufwenden (Alhalabi, 2016). Ergebnisse wie diese weisen alle auf die Vorteile von vollimmersiver Technologie hin. Im Gegensatz dazu gibt es auch Studien, die auf die Nachteile der vollimmersiven Technologien hinweisen. Beispielsweise stellten Fernandes et al. (2016) fest, dass die zunehmende Immersion durch das Hinzufügen von 3-D-Klängen und die grafische Darstellung der eigenen Hände in der virtuellen Umgebung einige Studienteilnehmende verwirrt und von der Lernaufgabe ablenkt (Jensen & Konradsen, 2018). Aufgrund der beschriebenen heterogenen Befunde zur Wirkung von Immersion auf das Lernen ist die Formulierung eindeutiger Empfehlungen für den Einsatz von vollimmersiver VR in Lern- und Trainingsumgebungen nicht ohne weiteres möglich und sollte für den jeweiligen Inhalt stets neu abgewogen werden.

Weitere Einschränkungen der vollimmersiven Umgebung bestehen in dem höheren technologischen Aufwand und der begrenzten Mobilität des notwendigen Equipments. Die Realisierung realistischer Interaktionen erfordert zusätzliche Schnittstellen, wie z. B. die Leap Motion Technologie, auf deren Integration oft aus ökonomischen Gründen verzichtet wird. Stattdessen werden kostengünstige Alternativen herangezogen, die zwar ein geringeres immersives Erlebnis bieten, jedoch breiter zugänglich und einfacher zu bedienen sind. Diese werden als teilimmersive und nichtimmersive Technologien bezeichnet und werden nachfolgend näher beschrieben.

Als nichtimmersiv werden VR Umgebungen bezeichnet, die direkt mit einem herkömmlichen Grafik-Computer über einen Monitor, eine Tastatur und eine Maus manipuliert

werden können. Diese unnatürliche, aber bisher am weitesten verbreitete Mensch-Maschine-Schnittstelle kann unter Umständen Vorteile bei der Nutzung der VR-Technologie bieten. Laut Robertson et al. (1993) haben nichtimmersives VR-Systeme drei wichtige Vorteile gegenüber immersiven VR-Systemen:

(1) Evolutionäre Vorteile, die durch den aktuellen Stand der Computerindustrie bedingt sind. Die evolutionären Vorteile der nichtimmersiven VR liegen in der Verwendung vertrauter Werkzeuge – Display, Tastatur und Maus – und in den geringeren Anlaufkosten.

(2) Grenzen oder Probleme der aktuellen vollimmersiven VR-Technologie. Trotz der rapiden technologischen Entwicklungen der letzten Jahre ermöglichen es die VR-Technologien immer noch nicht, vollständig in die künstliche Welt einzutauchen. Mangelnde Rechenleistung setzt nach wie vor Grenzen.

(3) Akzeptanz der Technologie. Die Frage, inwieweit die vollimmersive Technologie in der Praxis tatsächlich eingesetzt wird, ist oft entscheidend. Typische Büroangestellte werden wahrscheinlich nicht bereit sein, für ihre Arbeit eine spezielle Ausrüstung anzuziehen, vor allem, wenn diese ihre Umgebung verdeckt. Nichtimmersives VR hingegen erfordert keine spezielle Ausrüstung und verhindert nicht das Wahrnehmen der unmittelbaren Umgebung. Darüber hinaus kann die Nutzung von vollimmersiver VR über einen längeren Zeitraum mentale und physische Belastung verursachen, während die Belastungsfaktoren bei nichtimmersiver VR die gleichen sind wie bei allgemeiner Computernutzung und wahrscheinlich viel geringer als bei vollimmersiven Technologien (Robertson et al., 1993). Seit diesen Formulierungen von Robertson et al. (1993) sind einige Jahrzehnte vergangen. In dieser Zeit haben sich virtuelle Umgebungen weiterentwickelt, aber die oben genannten Einschränkungen bleiben bestehen, wenn auch nur in abgeschwächter Form.

Um die mit den vollimmersiven VR-Technologien verbundenen Probleme zu überwinden und gleichzeitig die Vorteile der nichtimmersiven Technologien zu nutzen, gibt es Zwischenlösungen, die als teilimmersive virtuelle Umgebungen bezeichnet werden.

Ähnlich wie vollimmersive Umgebungen ermöglichen auch teilimmersive Umgebungen, die meist durch Low-Budget-Geräte und Smartphones realisiert werden, eine egozentrische Darstellung von Räumen und Objekten. Natürliche Benutzerschnittstellen sind auch hier teilweise vorhanden, die Interaktionsmöglichkeiten sind jedoch begrenzt. Beispielsweise kann die Nutzerin bzw. der Nutzer aufgrund der fehlenden Raumerfassungssenso-

ren nicht auf natürliche Weise um die virtuellen Objekte herumgehen und sie aus verschiedenen Perspektiven betrachten. Technologische Beispiele für die Realisierung teilimmersiver Umgebungen sind Google Cardboard oder die VR-Brille Samsung Gear, die eine stereoskopische, egozentrische Darstellung der virtuellen Realität ermöglichen, jedoch nur begrenzte Bewegungs- und Interaktionsmöglichkeiten zur Verfügung stellen. Diese Geräte werden nicht mit einem Personal Computer (PC), sondern mit einem Smartphone verbunden, das direkt im HMD platziert wird. Dies hat den Vorteil, dass sie kabellos verwendet und räumlich flexibel genutzt werden können. Zur Darstellung des virtuellen Szenarios wird das Display des Smartphones verwendet, wovon die Auflösung der virtuellen Umgebung abhängt (Korgel, 2017). Für das Tracking der Kopfbewegung werden ein Beschleunigungsmesser und ein Gyroskop sowie Magnet- und Näherungssensoren verwendet (Hagen, 2017).

Zur Umsetzung virtueller Lern- und Trainingsumgebungen wird aufgrund der allgemein günstigen Verfügbarkeit und guten Mobilität der Geräte häufig auf die teilimmersive Technologie zurückgegriffen. Mit den Low-Budget HMDs können sich ganze Klassen oder Gruppen von Studierenden gleichzeitig mit der virtuellen Umgebung auseinandersetzen, was mit der räumlich unflexiblen HTC VIVE Technologie kaum möglich wäre. In komplexen räumlichen Zusammenhängen sollten jedoch die Vorteile der Integration zusätzlicher Benutzerschnittstellen und damit die Gewährleistung weiterer Interaktionsmöglichkeiten, die mit einem Lernerfolg verbunden sein können, gegen die Wirtschaftlichkeit der Endgeräte abgewogen werden. Die Frage, unter welchen Bedingungen voll-immersive Umgebungen einen Vorteil gegenüber teilimmersiven haben und die Suche nach vorteilhaften und nachteiligen Einflussfaktoren ist Gegenstand aktueller Forschungsinitiativen (Ariali & Zinn, 2020), es liegen jedoch bislang keine eindeutige Ergebnisse vor. Zudem ist die technologische Entwicklung im Bereich VR dynamisch, so werden aktuell zunehmend kabellose HMDs in einer Weiterentwicklung angeboten, bei denen 6DoF ermöglicht werden. Ein Beispiel hierfür ist die HTC VIVE Focus Plus, die es ermöglicht, Objekte in der Tiefe zu bewegen, ohne einen festen PC oder eine Basisstation zu verwenden.

Lerntheoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt wird der Hintergrund zu den beiden wichtigen Themen der Dissertation – immersive VR und Lerntheorien – vorgestellt. Die Kombination dieser Themen

erlaubt es, den Einsatz von VR in einem Bildungskontext besser zu verstehen und zu analysieren.

Lernen ist allgemein ein komplexer sowie vielschichtiger Prozess und umfasst nicht nur kognitive, sondern auch emotionale und motivationale Facetten (Becker-Carus & Wendt, 2017). Angermeier (1972) beispielsweise definiert Lernen als eine Veränderung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens bestimmter Verhaltensweisen, die sich als direkte Folge früherer Begegnungen mit dieser Situation einstellen (Angermeier, 1972). Lernen geschieht in ständiger Wechselwirkung mit der Umwelt. Dabei werden Informationen aufgenommen, mit Kognitionen und Emotionen verglichen, bewertet und verknüpft. Auf diese Weise können Fertigkeiten und Fähigkeiten erworben werden. Unter Fertigkeiten werden nach Adams (1987) komplexe Verhaltensweisen wie Schreiben, Musizieren oder Sprechen subsumiert, die einen erlernten oder erworbenen Anteil des Verhaltens ausmachen (Adams, 1987). Der Begriff der Fertigkeit grenzt sich vom Begriff der Fähigkeit ab. Fähigkeiten sind Voraussetzung für die Realisierung einer Fertigkeit. Fertigkeiten beinhalten sowohl wahrnehmungsbezogene (Finden eines Fehlers an einer Maschine) als auch motorische Prozesse, die durch Übung zu besseren Leistungen (z. B. Fehleranalyseleistung) führen können.

Der Erwerb von Fertigkeiten kann durch drei theoretische Schritte charakterisiert werden (Becker-Carus & Wendt, 2017). Im ersten Schritt werden bestimmte Reaktionen, Fakten oder Abfolgen gelernt. Im zweiten Schritt wird das erworbene Faktenwissen in Handlungswissen überführt, indem die erforderlichen Bewegungen wiederholt ausgeführt und geübt werden. Im dritten Schritt führt der Integrationsprozess durch weitere Übung dazu, dass die motorische Reaktion automatisch abläuft, ohne dass darüber nachgedacht werden muss (Becker-Carus & Wendt, 2017). Der Ablauf der beschriebenen Schritte kann mit Hilfe von digitalen Hilfsmitteln, einschließlich der VR-Technologie, beschleunigt bzw. vereinfacht werden. Die Potenziale der VR-Technologie in unterschiedlichen Lernkontexten lassen sich mit mehreren Lerntheorien und Ansätzen begründen.

Auf der Basis einer vergleichenden Literaturanalyse von 206 angloamerikanischen Publikationen aus dem Zeitraum von 2008 bis 2012 sind nach Loke (2015) im Bildungskontext folgende fundamentale Theorien und Ansätze für das Lehren und Lernen mit VR am häufigsten erwähnt: Erfahrungsbasiertes Lernen, Situiertes Lernen, Sozialkonstruktivismus, Konstruktivismus, Präsenztheorie und Flow-Theorie (Loke, 2015). Während Sozi-

alikonstruktivismus und Konstruktivismus vor allem in kollaborativen virtuellen Umgebungen relevant werden, rechtfertigen die übrigen vier Theorien den Einsatz von VR-basiertem Individualtraining. Das Training kognitiver Fertigkeiten und Fähigkeiten basiert oft auf zwei weiteren wichtigen Theorien, der Theorie der Embodied Cognition und der Theorie der kognitiven Belastung (Cognitive Load), die ebenfalls eine fundierte Grundlage für VR-basiertes Training bilden. Aus diesem Grund werden nachfolgend die sechs folgenden Theorien und ihre Rolle in VR-Umgebungen ausführlich beschrieben: (1.) Erfahrungsbasiertes Lernen, (2.) Situiertes Lernen, (3.) Präsenztheorie, (4.) Flow-Theorie, (5.) Embodied Cognition und (6.) Cognitive Load Theory.

Erfahrungsbasiertes Lernen. Die Theorie des erfahrungsbasierten Lernens (Dewey, 1938) betrachtet Lernen als einen Konstruktionsprozess, der immer eine aktive, reflektierende Auseinandersetzung mit konkreten Erfahrungen voraussetzt. Somit wird den Lernenden eine handelnde Rolle zugewiesen: Sie setzen sich mit der Lernumgebung aktiv auseinander und versuchen reale Problemstellungen zu lösen. Auf Grundlage der Theorie von Dewey (1938) konzipierte Kolb (1984) einen erfahrungsbasierten Lernzyklus, nach dem Lernen aus vier Schritten besteht: konkrete Erfahrung (1), Beobachtung und Reflexion (2), abstrakte Begriffsbildung (3) und aktives Experimentieren (4).

Der Lernprozess beginnt mit einer konkreten Erfahrung mit beobachtbarer Konsequenz. Auf der Grundlage dieser Erfahrung beobachtet die Lernerin bzw. der Lerner und reflektiert dann darüber. Dabei werden mögliche Ursachen für die Erfahrung gedanklich durchgespielt. Der Reflexionsprozess führt zur abstrakten Begriffsbildung, d.h. die konkrete Erfahrung beeinflusst die Wissensstruktur der Lernerin bzw. des Lerners. Die aus der Erfahrung gewonnenen Erkenntnisse können nun auf andere Situationen übertragen werden. Im vierten und letzten Schritt wird die Lernerin bzw. der Lerner wieder aktiv, indem sie bzw. er mit dem neu erworbenen Wissen experimentiert. Durch diesen letzten Schritt im Lernzyklus ist die Lernerin bzw. der Lerner wieder in der Lage, konkrete Erfahrungen zu machen, und ein neuer Zyklus beginnt. Somit ist das Lernen ein fortlaufender Prozess (Kolb, 1984).

Der Wissenserwerb in modernen Bildungseinrichtungen widerspricht dem Prinzip des erfahrungsbasierten Lernens, da die Lernenden keine Möglichkeit haben, selbst reale Erfahrungen zu sammeln. An diesem Punkt wären vollimmersive virtuelle Umgebungen eine effiziente Möglichkeit, konkrete (virtuelle) Erfahrungen in einer künstlichen Umge-

bung zu sammeln und mit dem erworbenen Wissen zu experimentieren. Die größere Anschaulichkeit und Interaktivität von VR-Technologien könnte es den Nutzerinnen und den Nutzern ermöglichen, virtuelle Erfahrungen als direkte Erfahrungen zu erkennen, was den Lerneffekt verstärken könnte (Kwon, 2019). Es ist jedoch zu hinterfragen, inwieweit eine virtuelle Erfahrung der realen Erfahrung ähnlich sein kann.

Situiertes Lernen. Die zentrale Forderung des situierten Lernens (Lave & Wenger, 1991) ist die Verbindung der Lern- und Anwendungsprozesse, um den Wissenstransfer zu optimieren. Unter dem Begriff „Situation“ wird sowohl die materielle als auch soziale Umwelt der Lernerin bzw. des Lerners verstanden und es wird davon ausgegangen, dass das Lernen dann am effektivsten ist, wenn ein situativer Bezug zur späteren Berufs- und Arbeitswelt hergestellt werden kann. Dies steht im Widerspruch zum alltäglichen Schulunterricht, da hier der Erwerb und die Anwendung von Wissen meistens zwei strikt voneinander getrennte Elemente sind. In deutschen Berufsschulen wird dem situierten Lernen eine große Aufmerksamkeit geschenkt. Insbesondere das durch die Kultusministerkonferenz (KMK) in die berufspädagogische Diskussion eingebrachte Lernfeldkonzept betont die Bedeutung der konkreten Anwendungssituationen im beruflichen Unterricht (Kultusministeriumkonferenz (KMK), 2007). Eine Integration von realen Lern- und Arbeitsplätzen ist oft mit einer Reihe von Problemen konfrontiert. Dazu zählen vor allem die Komplexität und die Risikofaktoren in den Arbeitsumgebungen. Simulierte, virtuelle Arbeitsumgebungen könnten die Lösung dieses Problems sein (Schenk et al., 2010). Denn man könnte vermuten, dass die VR einen Kontext bietet, der dasselbe Verhalten und Denken bei den Lernenden auslöst, wie eine reale Situation (Loke, 2015). Lernen und Arbeiten in solchen Umgebungen ist ungefährlich, es entstehen weder Materialverschleiß, noch Schäden an teuren Geräten und es besteht die Möglichkeit praxisnaher Gestaltung oder Modifizierung der Trainingssituationen (Katzky et al., 2013). Locke (2015) betrachtet jedoch die Gleichsetzung einer virtuellen Welt mit der realen Welt als problematisch: Zwar gibt es inzwischen Helme und Handschuhe, die die sensomotorischen Erfahrungen in der virtuellen Realität verbessern, doch entspricht die virtuelle Interaktion mit dem Körper eines virtuellen Patienten nicht dem sensomotorischen Erlebnis einer Untersuchung in der Realität (Locke, 2015). Inwieweit virtuelle Erfahrungen vergleichbar mit realen Erfahrungen sind und welchen Mehrwert diese im Vergleich zu den anderen Lernformen haben, gilt es noch zu untersuchen.

Präsenztheorie. Nutzende von VR-Umgebungen berichten häufig von einem intensiven Eindruck, sich physisch nicht in ihrer realen, sondern in einer künstlichen, dreidimensionalen Welt zu befinden (Biocca, 1997). Dieser kognitive Zustand wird als Präsenz bezeichnet und im Kontext von immersiven VR-Umgebungen intensiv untersucht. In den 1990er-Jahren erschienen in der Zeitschrift „Presence: Teleoperators and Virtual Environments“ viele Publikationen, die, begleitend zur VR-Forschung, ein tieferes Verständnis der Präsenztheorie vermittelten (Hendrix & Barfield, 1995; Slater, 1999; Witmer & Singer, 1998; Zeltzer, 1992). Seither gibt es zahlreiche Definitionen von Präsenz. Die am häufigsten benutzte Definition im Kontext von virtuellen Realitäten stammt von Witmer & Singer (1998): „the subjective experience of being in one place or environment, even when one is physically situated in another.“ Die Autoren untersuchten das Präsenzerleben mittels VR-Technologie im Rahmen der Militärausbildung und ermittelten unmittelbare positive Zusammenhänge zwischen „Task Performance“ und Präsenz. Im Gegensatz dazu vermuten manche Autorinnen und Autoren, dass es Aufgabenbereiche geben kann, in denen Präsenz in der Ausführung hinderlich sein kann. Diese Überlegungen legen nahe, dass die Leistung bei komplexen Aufgaben, die gewisse Abstraktionen erfordern, mit einem starken Präsenzgefühl negativ korrelieren kann (Lombard & Ditton, 1997). Außerdem könnte das Präsenzerleben durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden, die bei der Gestaltung von VR-Umgebungen berücksichtigt werden sollten.

Steuer (1992) schlug Lebendigkeit und Interaktivität als grundlegende Komponenten vor, die zur Präsenz beitragen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass eine erhöhte Lebendigkeit und Interaktivität die direkte Wahrnehmung der VR-Erfahrung stark beeinflussen. Dabei bezieht sich „Lebendigkeit“ auf die Fülle der sinnlichen Informationen in einer vermittelten Umgebung und „Interaktivität“ auf den Grad der Beteiligung an der Bearbeitung von Form und Inhalt der vermittelten Umgebung in Echtzeit (Steuer, 1992).

Aufgrund technischer Restriktionen konzentrierten sich die meisten früheren Studien im VR-Bereich auf die visuelle Lebendigkeit und nicht auf die Lebendigkeit der Hör-, Tast-, Geruchs- und Geschmackswahrnehmung. Gegenwärtig werden jedoch Studien zu mehrdimensionalen Controllern, Datenhandschuhen oder Leap Motion Technologie durchgeführt, die den direkten Kontakt mit virtuellen Objekten ermöglichen. Es wird erwartet, dass diese Technologien, die eine direkte Interaktion mit virtuellen Objekten ermöglichen, die taktile Lebendigkeit und somit das Präsenzerleben verbessern könnten.

Im Gegensatz zu Lebendigkeit und Interaktivität gibt es Faktoren, die sich negativ auf das Präsenzerleben auswirken. Zu ihnen gehört die Simulatorkrankheit (Maraj et al., 2017). Verschiedene experimentelle Studien (z. B. Draper et al., 2001; Treleaven et al., 2015) haben berichtet, dass die Verwendung von VR-Geräten mit HMD die Simulatorkrankheit verursachen kann, die sich wiederum negativ auf das Präsenzerleben auswirkt. Mit modernen VR-Technologien und der Möglichkeit von 6Dof tritt die Simulatorkrankheit jedoch sehr selten auf.

In einer weiteren Studie, die die Korrelationen zwischen Persönlichkeitsmerkmalen und Lernerfahrungen untersuchte, stellten Autoren fest, dass Menschen mit ängstlicheren Persönlichkeiten nicht nur eine weniger positive Erfahrung in VR machten, sondern auch weniger Präsenz erlebten. Dies veranlasste den Forscher zu der Schlussfolgerung, dass Lernende mit bestimmten individuellen Eigenschaften und Merkmalen weniger vom Lernen in VR profitieren werden (Jensen & Konradsen, 2018).

Um virtuelle Lern- und Trainingsumgebungen optimal zu gestalten, ist die Suche nach weiteren Faktoren, die das Präsenzerleben beeinflussen, eine wichtige Aufgabe der VR-bezogenen Grundlagenforschung.

Flow-Theorie. Flow beschreibt einen Zustand, in dem eine Nutzerin bzw. ein Nutzer so in eine Aktivität eingetaucht ist, dass sie bzw. er an keiner anderen Aktivität interessiert ist. Dieser Zustand ist vor allem bei Personen beobachtbar, die eine offensichtlich intrinsisch motivierte Tätigkeit durchführen. Die Tätigkeit im Flow wird als ein einheitliches „Fließen“ erlebt, wobei die Person kaum eine Trennung zwischen sich und der Tätigkeit verspürt (Csikszentmihalyi, 1997). Bisherigen Studien zufolge korreliert Flow-Erleben positiv mit dem Präsenzerleben und mit der Motivation (Zinn et al., 2016). Die motivationssteigernde Wirkung des Flow-Erlebens wurde besonders intensiv in der Computerspielforschung (Sherry, 2004; Voiskounsky et al., 2004) und in den letzten Jahren auch in der bildungsrelevanten VR-Forschung (Zinn et al., 2016) untersucht. Empirischen Ergebnissen zufolge wird sogar behauptet, dass Flow ein Erfahrungsmerkmal ist, das in der VR leicht induziert werden (Kwon, 2019) und dadurch sowohl die Lernmotivation als auch die Leistung beeinflussen kann (Engeser et al., 2005). Um das Flow-Erleben in VR aufrechtzuerhalten, wird bei der Gestaltung der Lernumgebung ein bestmögliches Verhältnis zwischen den Anforderungen und den Fähigkeiten der Nutzerinnen und der Nutzer empfohlen (Bente et al., 2002).

Embodied Cognition. Die Grundidee des Embodiment-Ansatzes besteht darin, dass der Körper an sich einen grundlegenden Einfluss auf Kognition und menschliches Handeln hat (Storch et al., 2010). Demzufolge steht die Psyche in einer reziproken Beziehung zum Körper (Wilson, 2002): Die Psyche beeinflusst nicht nur den Körper, sondern der Körper kann auch Einflüsse auf das kognitive System ausüben (Storch et al., 2010). Belege für diesen Ansatz liefern die Facial-Feedback-Hypothese (Ekman, 1992) und entsprechende empirische Befunde, die zeigen, dass ein bestimmter Gesichtsausdruck (z.B. Lächeln) entsprechende neuronale Muster im Gehirn aktiviert, sodass die entsprechende Emotion tatsächlich erlebt wird (z.B. Freude). Um die Facial-Feedback-Hypothese zu überprüfen, wurden in einer Studie die Versuchspersonen in zwei Gruppen aufgeteilt. Eine Gruppe erhielt die Anweisung, einen Stift zwischen die Zähne zu klemmen, die andere Gruppe die Anweisung, einen Stift zwischen den Lippen zu halten. Dem liegt die Beobachtung zugrunde, dass ein Stift zwischen den Zähnen einem lachenden Gesicht, ein Stift zwischen den Lippen einem unzufriedenen Gesicht gleicht. Während die Versuchspersonen den Stift in ihrem Mund hielten, wurden sie gebeten, einen Comic zu lesen und zu bewerten, wie lustig sie den Comic fanden. Die Ergebnisse zeigten, dass die Studienteilnehmerinnen und Studienteilnehmer, die den Stift zwischen den Zähnen hielten, den Comic signifikant lustiger fanden als die Teilnehmerinnen und Teilnehmer, die den Stift zwischen den Lippen hielten (Strack et al., 1988). Riskind und Gotay (1982) postulierten, dass neben der Mimik auch Körperhaltungen entsprechende Emotionen hervorrufen können und bestätigten dies empirisch, indem sie zeigten, dass eine aufrechte oder gebeugte Körperhaltung einen nachweislichen Effekt auf das Durchhaltevermögen in einer unlösbaren Aufgabe hat: Versuchspersonen, die für eine bestimmte Zeit eine gebeugte Körperhaltung einnahmen, gaben bei einem unlösbaren Puzzle schneller auf als Personen mit einer aufrechten Körperhaltung. Die Autor und die Autorin schlussfolgerten, dass eine gebeugte Haltung mit dem Prinzip der gelernten Hilflosigkeit assoziiert wird und deshalb schneller aufgegeben wird (Riskind & Gotay, 1982).

Ausgehend vom Embodied-Cognition-Ansatz gibt es eine zunehmende Tendenz in neu entstehenden Technologien, vor allem bei VR-Technologie, den menschlichen Körper in die Schnittstelle einzubeziehen und an diese zu koppeln (Biocca, 1997). Dies ist mit der Integration von Avataren in künstliche Umgebungen möglich. Hier ist die Ich-Perspektive eine Grundvoraussetzung, um das Gefühl der Verkörperung in einem Avatar zu induzieren (González-Franco et al., 2010; Maselli & Slater, 2013). In der VR helfen zusätzlich HMDs dabei, visuelles Feedback von den Augen des Avatars zu geben und die Sicht

der Teilnehmerinnen bzw. der Teilnehmer aus der realen Welt zu verdecken. Die Kopfbewegungen der Nutzerin bzw. des Nutzers werden verfolgt und mit denen des Avatars synchronisiert, um ein visuelles Echtzeit-Feedback der Avatar-Umgebung in Übereinstimmung mit diesen Bewegungen zu bieten. Akustisches Feedback wird mithilfe von Kopfhörern oder Lautsprechern implementiert. Haptisches Feedback kann mit verschiedenen Arten von haptischen Geräten realisiert werden, die das Greifen und Bewegen von Objekten, das Fühlen einer Textur oder das Empfinden einer Force Feedback ermöglichen (Kreimeier et al., 2019). Um eine Identifikation mit dem Körper des Avatars herzustellen, können die Nutzerinnen und die Nutzer ihre Gliedmaßen und einen Teil ihres eigenen Körpers sehen, wenn sie nach unten schauen. Die Ganzkörper-Identifikation wird durch die Verwendung von reflektierenden Oberflächen wie Spiegeln erreicht (Aymerich-Franch, 2018). Durch diese Maßnahmen fühlen sich die Nutzerinnen und die Nutzer am Ort ihrer Avatare präsent und erleben die Avatare so, als wären sie ihr wahres Selbst.

Um zu zeigen, dass Menschen in der Lage sind, den Körperbesitz einer künstlichen Gliedmaße zu erfahren, wird oft das Illusionsexperiment mit der Gummihand (Botvinick & Cohen, 1998) herangezogen. Als Erweiterung dieses Paradigmas wurden Ganzkörperillusionen mit virtuellen Körpern verwendet, um zu zeigen, dass das Gefühl des Körperbesitzes auch auf einen vollständigen Körper übertragen werden kann (Aymerich-Franch, 2018).

Da die VR- Lernumgebungen heutzutage vielfältige sensomotorische Erfahrungen anbieten können, entsteht die durch Embodied Cognition begründete Annahme, dass Lernprozesse durch solche Umgebungen erleichtert werden. In diesem Kontext ist die grundlegende Erforschung von relevanten natürlichen Benutzerschnittstellen äußerst wichtig.

Cognitive Load Theory. In der Cognitive Load Theory (CLT) beschreibt Sweller (2011) verschiedene Belastungsarten, welche beim Lernen auftreten können und den Wissenserwerb beeinflussen (Sweller, 2011). Die Theorie lehnt sich an das Modell der Architektur des menschlichen Gedächtnisses von Baddley (1992) an. Wichtige Annahmen von Baddley für die Cognitive Load Theory sind, dass die Arbeitsgedächtniskapazität begrenzt ist und gleichzeitig nur eine bestimmte Menge an Informationen aufrechterhalten werden kann (Baddeley, 1992). In der CLT werden drei Arten von Belastungen des Arbeitsgedächtnisses unterschieden. Die Belastung, die durch die Art des zu lernenden Inhalts verursacht wird, bezeichnen Sweller (2011) als intrinsische Belastung (intrinsic Load). Diese Belastung wächst mit der Anzahl an sich gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis befindenden

Wissenselementen, wobei das Ausmaß der intrinsischen Belastung immer vom Expertisegrad der Lernerin bzw. des Lerners abhängig ist. Die zweite Belastung, die in der CLT spezifiziert wird, ist die extrinsische Belastung (extraneous Load). Diese ist direkt durch das instruktionale Design des Lernmaterials beeinflussbar und gilt als unnötige Belastung, da sie durch das richtige Gestalten von Lernmaterialien beseitigt werden kann. Die Kombination von hoher extrinsischer und intrinsischer Belastung kann zu einer kognitiven Überlastung (cognitive Overload) führen. Dies hat zur Folge, dass der Wissenserwerb beeinträchtigt oder sogar überhaupt nicht mehr möglich ist. Die lernbezogene Belastung (germane Load) entsteht durch die kognitive Anstrengung beim Automatisieren von Schemata. Effektives Lernen findet somit nur statt, wenn die kognitiven Ressourcen optimal ausgenutzt werden und dabei ausreichend freie Kapazität für die lernbezogene Belastung übrig bleibt. Es gibt Hinweise darauf, dass optimale kognitive Belastung auch in den virtuellen Realitäten eine entscheidende Rolle spielt. Murcia-López und Steed (2016) zeigen zum Beispiel, dass räumliche Wissensaufgaben in den virtuellen Umgebungen im Vergleich zu desktopbasierten Umgebungen nur dann besser gelöst werden, wenn die virtuelle Umgebung hinreichend komplex ist (Murcia-López & Steed, 2016). Aber was ist hinreichend komplex? In den vorliegenden Studien gibt es bislang keine eindeutigen Vorschläge bezüglich optimaler Gestaltungsformen von virtuellen Lern- und Arbeitsumgebungen. Erste Untersuchungen zeigen zwar, dass Handlungsmöglichkeiten in der VR das episodische Gedächtnis allgemein unterstützen (Plancher et al., 2013), da aber eine interaktive Gestaltung der VR auch mit großem ökonomischen Aufwand verbunden ist, stellt sich die Frage, ob der Mehrwert komplexer interaktiver Umgebungen tatsächlich gegeben ist.

Basierend auf den oben beschriebenen Lerntheorien und technologischen Entwicklungspotenzialen werden VR-basierte Lern- und Trainingsanwendungen im Allgemeinen optimistisch gesehen. VR hat das Potenzial, die kognitive Wahrnehmungs- und Vorstellungsfähigkeit der Menschen zu verändern, indem sie ihnen die Möglichkeit gibt zu sehen, was in der Realität nicht gesehen werden kann und zu erfahren, was in der realen Welt nicht möglich ist. Im Bildungsbereich gibt die virtuelle Welt den Lernenden die Möglichkeit, sich von ihrer physischen Lernumgebung abzukoppeln und gemeinsam die virtuellen Lernräume zu betreten. Zudem kann VR mit haptischen Lösungen und Ideen der Gamifizierung kombiniert werden, um das Lernen zu unterstützen und vielfältige Erfahrungen zu ermöglichen (Daniela & Lytras, 2019).

Angesichts der genannten Potenziale und der in den letzten Jahrzehnten deutlich verbesserten Qualität und Verfügbarkeit von VR-Hardware werden nach und nach diverse VR-Anwendungen in die verschiedenen Bildungsbereiche integriert. Jensen und Konradsen (2018) führten eine umfassende Recherche durch, um die Anwendungen qualitativ zu bewerten und zu analysieren. Die Forscher identifizierten eine Reihe von Situationen, in denen virtuelle Umgebungen für den Wissenserwerb nützlich sind. Dazu gehören kognitive Fähigkeiten im Zusammenhang mit dem Erinnern und Verstehen von räumlichen und visuellen Informationen und Wissen; psychomotorische Fähigkeiten im Zusammenhang mit Kopfbewegungen, wie z.B. visuelles Scannen oder Beobachtungsfähigkeiten, und affektive Fähigkeiten im Zusammenhang mit der Kontrolle von emotionalen Reaktionen auf Stress induzierende oder schwierige Situationen (Jensen & Konradsen, 2018).

Zusammenfassend lässt sich auf Basis der beschriebenen theoretischen Grundlagen und des Forschungsstandes sagen, dass VR-Umgebungen in vielfältiger Weise für Lernzwecke eingesetzt werden können und dabei erhebliches Potenzial aufweisen. Allerdings sind die Auswirkungen dieser Technologie auf Lernprozesse sowie die förderlichen und hinderlichen Aspekte noch nicht ausreichend erforscht und die vorhandenen Befunde sind sehr heterogen. In Zukunft sollten mehr empirische Studien organisiert werden, um verschiedene Einsatzmöglichkeiten von VR in Lern- und Trainingsumgebungen zu testen. Die vorliegende Arbeit leistet einen Beitrag auf diesem Gebiet und untersucht verschiedene Test- und Trainingsmöglichkeiten für die mentale Rotationsfähigkeit in VR.

1.2.2 Theoretische Grundlagen und Forschungsstand zur mentalen Rotationsfähigkeit

Die mentale Rotationsfähigkeit beschreibt die Fähigkeit, 2-D- oder 3-D-Figuren und Objekte mental zu drehen (Linn & Petersen, 1985). Sie wird den räumlichen Fähigkeiten zugeordnet, einem Aspekt der menschlichen Intelligenz (Hegarty & Waller, 2005). Die räumliche Fähigkeit vermag visuell-räumliche Informationen zu speichern, abzurufen und zu transformieren (Colom et al., 2002). Es gibt verschiedene Theorien und Modelle zu räumlichen Fähigkeiten. Thurstone (1938) z.B. postulierte eine Drei-Faktor-Hypothese, nach der Visualisierung, räumliche Beziehungen und räumliche Orientierung die drei wichtigsten Unterfaktoren der räumlichen Fähigkeit sind (Thurstone, 1938). Eine weitere wichtige Definition der räumlichen Fähigkeit stammt von Linn & Petersen (1985), die ebenfalls drei Subfaktoren des Konstrukts identifizierten, darunter räumliche

Wahrnehmung, mentale Rotation und räumliche Visualisierung. Carroll (1993) unterteilte die räumlichen Fähigkeiten in fünf Hauptfaktoren, darunter räumliche Visualisierung, räumliche Beziehungen, Schließgeschwindigkeit, die Flexibilität des Schließens und die Wahrnehmungsgeschwindigkeit (Carroll, 1993). Trotz dieser Diskrepanzen ist die mentale Rotation ein Bestandteil all dieser Modelle und Theorien.

Mentale Rotation beschreibt die mentale Simulation der Drehung eines Objekts im Raum (Hegarty & Waller, 2005) und erfordert kognitive Prozesse, um sich vorzustellen, wie Objekte erscheinen, wenn sie gedreht werden (Heil & Rolke, 2002; Jäncke & Jordan, 2007). Einigen Ansichten zufolge sind diese kognitiven Prozesse mit der physischen Rotation verbunden und bewirken die Aktivierung von motorischen Repräsentationen, die mit der tatsächlichen physischen Rotation von Objekten verbunden sind (Adams et al., 2014). Um diese Ansicht zu unterstützen, schlugen Wohlschläger und Wohlschläger (1998) die Hypothese des „Common-Prozesses“ vor, die besagt, dass es einen gemeinsamen Prozess gibt, der sowohl die motorischen Kommandos für die manuelle Objektrotation als auch die Veränderung der kognitiven Prozesse für die mentale Rotation steuert. Wohlschläger und Wohlschläger (1998) bewiesen ihre Theorie in einer Reihe von Experimenten, in denen mentale und simulierte manuelle Rotation für dieselben Stimuli verglichen wurden. Bei Rotationen um kartesische Achsen stellten sie fest, dass die Reaktionszeiten der manuellen und mentalen Rotation funktionell miteinander verbunden sind (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998). Die Annahme von Wohlschläger und Wohlschläger (1998) wird auch durch die Ergebnisse von Shepard & Metzler (1971) gestützt, die eine lineare Beziehung zwischen dem Rotationswinkel der Figur und der Geschwindigkeit der mentalen Rotation nachwiesen.

Mentale Rotationstests

In den frühen 1970er-Jahren entwickelten Shepard und Metzler (1971) einen Untersuchungsansatz der mentalen Rotation, der noch heute die Intelligenzforschung stark beeinflusst. Die methodische Grundidee dieses Ansatzes bestand darin, Reize verschiedener Orientierungen im Hinblick auf ihre Formähnlichkeit zu beurteilen. In ihrer ursprünglichen Studie stellten sie ihren Probandinnen und Probanden Paare von dreidimensionalen Würfelfiguren vor, die entweder identisch oder spiegelverkehrt waren (siehe Abbildung 1). Darüber hinaus wurden beide Figuren um eine Achse gedreht, sodass der Winkelunterschied zwischen den Figuren in 20°-Schritten variiert wurde. Die Aufgabe der Test-

personen bestand darin, möglichst schnell (chronometrische Methode: Erfassung der Reaktionszeit) und möglichst genau (psychometrische Methode: Erfassung der Rate der korrekt gelösten Items) zu entscheiden, ob die gezeigten Objekte identisch oder gespiegelt waren (Shepard & Metzler, 1971). Diese Vorgehensweise von Shepard und Metzler (1971) ist zum Standard für die Messung der mentalen Rotationsfähigkeit geworden, wobei die Rahmenbedingungen und die Darbietungsart des Testmaterials von verschiedenen Forscherinnen und Forschern verändert und variiert wurden.

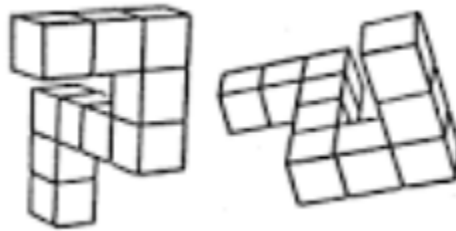


Abbildung 1: Beispielfiguren aus der Studie von Shepard und Metzler (1971)

Die momentan am häufigsten verbreitete diagnostische Möglichkeit zur Erfassung der mentalen Rotationsfähigkeit stellt der mentale Rotationstest (MRT) nach Vandenberg & Kuse (1978) in der Version von Peters et al. (1995) dar. Die 24 Testitems bestehen aus dreidimensionalen Würfelkonstruktionen. Bei jeder Testaufgabe ist eine vorgegebene Würfelkonstruktion mit den vier übrigen Figuren auf der rechten Seite zu vergleichen (Abbildung 2). Jeweils zwei Figuren rechts sind Rotationen der Zielfigur, die anderen zwei Figuren sind nicht mit der Zielfigur identisch. Die beiden rotierten Versionen sollen von den Probandinnen bzw. Probanden erkannt werden. Dann – und nur dann –, wenn beide Versionen richtig erkannt sind, wird ein Punkt pro Item vergeben, sodass die maximale Punktzahl im MRT 24 ist.

Mit der Einführung innovativer Lernumgebungen wurden zunehmend digitale Alternativen des Papier-Bleistift-MRT entstanden (Monahan et al., 2008). Auch die Idee einer virtuellen Erfassung dieser Fähigkeit ist nicht neu, wenngleich bisher keine standardisierten virtuellen Testinstrumente vorhanden sind.

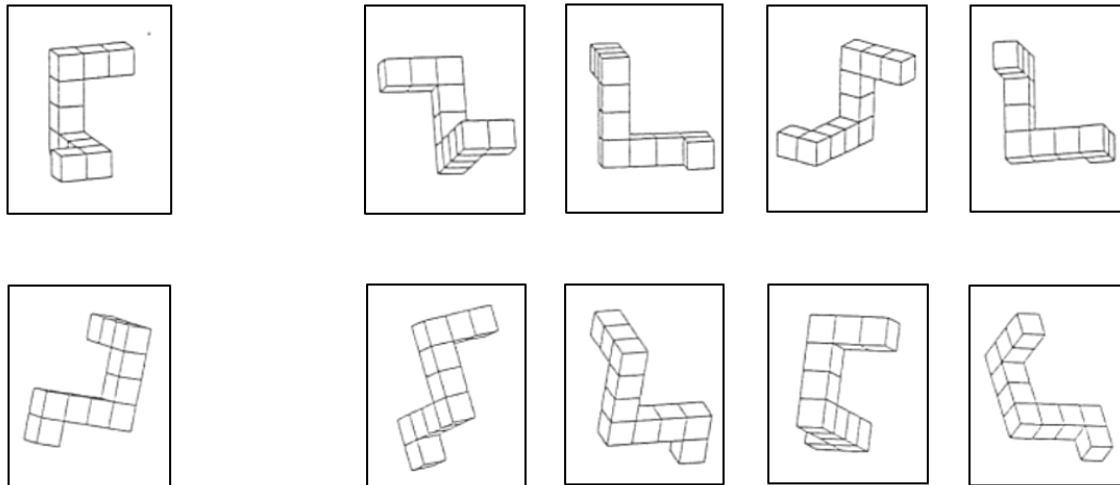


Abbildung 2: Beispielaufgaben aus MRT (Peters et al., 1995)

Geschlechtsspezifische Unterschiede

Das Verständnis der geschlechtsspezifischen Unterschiede bei der mentalen Rotationsfähigkeit ist seit Langem ein Thema in der psychologischen und Intelligenzforschung. Inzwischen gibt es konsistente Belege dafür, dass Männer in mentalen Rotationstests den Frauen überlegen sind (z.B. Linn & Petersen, 1985; Voyer et al., 1995). Zur Erklärung dieser Unterschiede werden verschiedene Argumente herangezogen, z. B. biologische, strategische, erfahrungsbezogene, affektive oder testdurchführungsbezogene Faktoren (Maeda & Yoon, 2013).

Biologische Theorien betonen die Bedeutung des hormonellen Einflusses (Hausmann et al., 2000) sowie der funktionellen und morphologischen Organisation des Gehirns (Jordan et al., 2002). Andere Autorinnen und Autoren schlugen wiederum vor, dass biologische Geschlechtsunterschiede zu Unterschieden bei der kognitiven Verarbeitung und der Annahme einer bestimmten Problemlösungsstrategie für mentale Rotationsaufgaben führen (Geiser et al., 2006; Guay, 1978; Thomsen et al., 2000).

Neuere Studien belegen, dass der affektive Zustand eines Individuums die Leistung bei räumlichen Aufgaben beeinflussen kann. Zum Beispiel kann das Selbstvertrauen ein wichtiger Einflussfaktor sein. Die Forschung hat gezeigt, dass die Geschlechtsunterschiede zunehmen, wenn die Probanden glauben, dass Männer in mentalen Rotationstests den Frauen überlegen sind (Ortner & Sieverding, 2008).

Alternativ könnte das Ausmaß der geschlechtsspezifischen Unterschiede in der mentalen Rotationsfähigkeit eher auf die bisherigen räumlichen Erfahrungen einer Person zurückzuführen sein. Mit anderen Worten: Die mentale Rotationsfähigkeit kann durch Aktivitäten gefördert werden, die mit räumlichen Aufgaben verbunden sind (Ginn & Pickens, 2005). Forschende fanden heraus, dass einige Aktivitäten, die mit räumlichen Aufgaben verbunden sind, bei Jungen häufiger vorkommen als bei Mädchen wie z.B. das Spielen von Computer- und/oder Videospiele (Quaiser-Pohl et al., 2006), das Spielen bestimmter Sportarten (Ginn & Pickens, 2005) oder das Spielen mit Bauspielzeug. Diese Aktivitäten bieten Jungen häufiger als Mädchen räumliche Erfahrungen, was zur Überlegenheit der Jungen bei mentalen Rotationsaufgaben beitragen kann.

Eine weitere Erklärung für geschlechtsspezifische Unterschiede bezieht sich auf die Art und Weise, wie die Aufgaben präsentiert werden (Kozhevnikov et al., 2015). Beispielsweise fand Monahan et al. (2008) heraus, dass die überlegene Leistung von Männern gegenüber Frauen bei einem mentalen Rotationstest von einer großen zu einer mittleren Effektgröße abnahm, wenn derselbe räumliche Test in einem computergestützten Format statt in einem Paper-Pencil-Format durchgeführt wurde. Kozhevnikov et al. (2015) weisen außerdem darauf hin, dass die Paper-Pencil- oder bildschirmbasierten Darstellungen der mentalen Rotationsaufgaben ausschließlich objektbasiert sind. Bei objektbasierten Rotationen bleibt die Position der Beobachtenden bzw. des Beobachtenden unverändert und der Stimulus wird mental in Relation zur Umgebung gedreht, während bei egozentrischen Transformationsaufgaben die eigene Perspektive verändert und in die Position des Stimulus gesetzt wird. Dies führt dazu, dass ein simulativer Rotationsprozess des eigenen Körpers in Gang gesetzt wird (Devlin & Wilson, 2010; Kessler & Rutherford, 2010). Es gibt Hinweise darauf, dass Frauen mit objektbasierten Darstellungen Schwierigkeiten haben. Folglich würden sie in den mentalen Rotationstests, wenn sie aus der egozentrischen Perspektive dargestellt wären, genauso gut abschneiden wie Männer (Seurinck et al., 2004). Mit der VR-Technologie entstehen neue Darstellungsmöglichkeiten, die es bisher nicht gab oder die technologisch sehr komplex und teuer waren. Mittlerweile können die Stimuli (Würfelfiguren) von Shapert und Metzler (1971) auch aus einer egozentrischen Perspektive betrachtet werden. Damit eröffnen sich neue Möglichkeiten, räumliches Vorstellungsvermögen und Geschlechterunterschiede in MRT grundlegend zu untersuchen.

Trainierbarkeit der mentalen Rotationsfähigkeit

Inzwischen gibt es zahlreiche Belege dafür, dass die mentale Rotationsfähigkeit durch Training verbessert werden kann (Adams et al., 2014; Uttal et al., 2013; Wiedenbauer et al., 2007) und die Effekte des Trainings auf andere Aufgaben übertragen werden können (Wright et al., 2008). Einigen Autorinnen und Autoren zufolge sind kognitive Prozesse, die der mentalen Rotationsfähigkeit zugrunde liegen, mit der tatsächlichen körperlichen Rotation verknüpft und können entsprechende motorische Prozesse aktivieren. Wohlschläger und Wohlschläger (1998) schlugen eine Common-Process-Hypothese vor, die besagt, dass mentale und manuelle Rotationen auf einem gemeinsamen Prozess beruhen. Der Autor und die Autorin weisen auf eine Reihe von Studien hin, die einen Zusammenhang zwischen den Reaktionszeiten manueller und mentaler Rotationen gefunden haben. Auf der Grundlage der Common-Process-Hypothese kann davon ausgegangen werden, dass manuelles Training die mentale Rotationsfähigkeit verbessern kann. Diese Annahme wurde durch eine Studie von Wiedenbauer et al. (2007) gestützt, in der die Autorinnen eine Trainingsaufgabe entwickelten, bei der die Teilnehmenden die Orientierungen von zwei Shepard- und Metzler-Stimuli mithilfe eines Joysticks ausrichten mussten. Das manuelle Training führte zu einer besseren mentalen Rotationsleistung mit vertrauten Objekten. Inzwischen gibt es weitere Belege für die Wirksamkeit des manuellen Trainings auf die mentale Rotationsfähigkeit (Adams et al., 2014).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die mentale Rotationsfähigkeit eine relativ lange und intensiv erforschte Dimension des räumlichen Vorstellungsvermögens verkörpert. Der mentale Rotationstest, ursprünglich entwickelt von Shepard und Metzler (1971), liegt in mehreren Versionen vor. Eine Besonderheit dieses Tests ist, dass er starke Geschlechtsunterschiede aufzeigt, deren Ursachen nicht eindeutig geklärt sind. Es wurde auch mehrfach gezeigt, dass der MRA trainiert werden kann. Insbesondere das manuelle Training mentaler Prozesse scheint erfolgsversprechend zu sein.

Die Durchführung und Untersuchung von manuellen Trainingsumgebungen der mentalen Rotationsfähigkeit sind unter realen Bedingungen aufgrund der schwierigen Standardisierbarkeit und der Kontrolle von Störvariablen eine Herausforderung. Die immersiven virtuellen Realitäten ermöglichen es, Trainingsumgebungen zu realisieren, die die Eliminierung oder Kontrolle der Störvariablen und die Standardisierung relevanter Parameter erlauben. Zusätzlich bieten virtuelle Umgebungen die Möglichkeit, die Lerninhalte durch automatisierte Sammlung und Auswertung personenbezogener Daten an die Fähigkeiten

und Bedürfnisse der Nutzerinnen und der Nutzer anzupassen. Diese Art der Gestaltung wird als adaptiv bezeichnet und im nächsten Abschnitt ausführlich beschrieben.

1.2.3 Theoretische Grundlagen und Forschungsstand zu adaptiven Lern- und Trainingsumgebungen

Adaptives Lernen ist eine Art Lernprozess, bei dem der Lerninhalt auf der Grundlage der Reaktionen der Lernenden bzw. des Lernenden verändert oder angepasst wird (Oxman & Wong, 2014). Laut Paramythis und Loidl-Reisinger (2004) kann eine Lernumgebung als adaptiv betrachtet werden, wenn sie in der Lage ist, die Aktivitäten ihrer Nutzerinnen und Nutzer zu überwachen, diese zu interpretieren, aus den interpretierten Aktivitäten Anforderungen und Präferenzen abzuleiten und schließlich auf der Grundlage des verfügbaren Wissens über ihre Nutzerinnen und Nutzer und den jeweiligen Inhalten zu handeln, um den Lernprozess dynamisch zu erleichtern (Paramythis & Loidl-Reisinger, 2004). Sie schlagen dabei vier verschiedene Möglichkeiten zur Anpassung adaptiver Lernumgebungen vor: *Adaptive Interaction*, *Adaptive Course Delivery*, *Content Discovery* und *Adaptive Collaboration Support*. Die erste Kategorie, *Adaptive Interaction*, bezieht sich auf Anpassungen, die an der Schnittstelle des Systems stattfinden und die die Interaktion der Benutzerin bzw. des Benutzers mit dem System erleichtern oder unterstützen sollen, ohne jedoch den Lerninhalt selbst in irgendeiner Weise zu verändern. Beispiele für Anpassungen auf dieser Ebene sind der Einsatz unterschiedlicher Grafik- oder Farbschemata, Schriftgrößen usw. Die zweite Kategorie, *Adaptive Course Delivery*, zielt darauf ab, eine Schulung (oder in einigen Fällen eine Reihe von Schulungen) auf die einzelne Lernende bzw. auf den einzelnen Lernenden zuzuschneiden. Die Absicht besteht darin, die „Passung“ zwischen Schulungsinhalten und Benutzermerkmalen/Anforderungen zu optimieren, sodass ein „optimales“ Lernergebnis erzielt wird, während gleichzeitig der Zeit- und Interaktionsaufwand für eine Schulung auf ein „Minimum“ reduziert wird. Die typischen Beispiele für Anpassungen in dieser Kategorie sind die dynamische (Re-)Strukturierung von Kursen, adaptive Navigationsunterstützung und adaptive Auswahl von alternativem Unterrichtsmaterial. Die dritte Kategorie, *Content Discovery and Assembly*, bezieht sich auf die Anwendung adaptiver Techniken bei der Entdeckung und Zusammenstellung von Lernmaterial aus potenziell verteilten Quellen. Die adaptive Komponente dieses Prozesses besteht in der Verwendung von anpassungsorientierten Modellen und aus dem Monitoring abgeleiteten Wissen über Benutzerin bzw. Benutzer. Die vierte und letzte Kategorie, *Adaptive Collaboration Support*, soll die adaptive Unterstützung von Lernprozessen

erfassen, welche die Kommunikation zwischen mehreren Personen (und damit die soziale Interaktion) und möglicherweise die Zusammenarbeit zur Erreichung gemeinsamer Ziele beinhaltet.

Ähnlich zum adaptiven Lernen kann adaptives Training als solches beschrieben werden, das individuelle Unterschiede mit Trainingsanweisungen in Einklang bringt (Park & Lee, 2003). Nach Kelley (1969) wird beim adaptiven Training das Problem, der Stimulus oder die Aufgabe in Abhängigkeit von der Leistung der Trainierenden bzw. des Trainierenden variiert. In einem adaptiven Trainingszenario kann die Reihenfolge, das Tempo oder der Schwierigkeitsgrad der Inhalte während des Trainingsprozesses beispielsweise auf die Fähigkeiten, Präferenzen oder die Motivation der Lernerin bzw. des Lernalerners zugeschnitten werden, um die Trainingseffizienz zu erhöhen (Landsberg et al., 2012).

Konzepte für adaptive VR-Trainingssysteme enthalten in der Regel drei grundlegende Komponenten, die in Feedback-Schleifen miteinander verbunden sind (Vaughan et al., 2016; Zahabi & Razak, 2020):

Zu Beginn wird die Leistung der Trainierenden bzw. des Trainierenden gemessen. *Leistungsmessungen* erfolgen durch eine Kombination von Offline- und Echtzeit-Messungen. Beispiele für die Messwerte sind Profilinformatoren (z.B. Erfahrung, Alter, Lerntyp), physiologische Messungen (z.B. Eye-tracking, Herzfrequenz, galvanische Hautreaktion) oder Aufgabenleistung (z.B. Fehlerrate und -typ) (Zahabi & Razak, 2020).

Basierend auf den Leistungsmessungen wählt die *adaptive Logik* bzw. der *adaptive Algorithmus* die nächste Aufgabe entsprechend den aktuellen Trainingsanforderungen der Person aus. Ein adaptiver Algorithmus ist ein Regelsystem, das zu Beginn und während des Tests die Itemauswahl trifft sowie Kriterien der Testbeendigung spezifiziert (Frey, 2012). Es gibt verschiedene Algorithmen, die adaptiven Lernumgebungen zugrunde liegen können. Bei ihrer Literaturübersicht zur Identifizierung der adaptiven VR-basierten Trainingsansätze, die in verschiedenen Domänen verwendet werden, stellten Zahabi & Razak (2020) fest, dass die Mehrheit von Studien maschinelles Lernen oder Optimierungsalgorithmen verwendeten. Diese umfassen unter anderem künstliche neuronale Netze (engl. Artificial Neural Network, ANN) (Bekele et al., 2013), Support-Vektor-Maschinen (SVM) (Wang et al., 2017), Fuzzy Inference Systems (Mourning & Ying, 2017), etc. Darüber hinaus verwendete etwa ein Drittel der Studien bedingte Anweisungen oder regelbasierte Systeme als adaptive Logik. Solche Anweisungen waren hauptsächlich darauf ausgelegt, die Leistung des Trainierenden mit den Schwellenwerten zu vergleichen

und die adaptive Variable entsprechend anzupassen (z. B. das Szenario leichter zu machen, wenn der Benutzer eine Mindestanforderung an die Aufgabe nicht erfüllt hat).

Die *adaptive Variable* ist ein anpassbares Merkmal, das sich auf der Grundlage der Leistung der Trainierenden bzw. des Trainierenden ändert (z.B. Schwierigkeitsgrad der Aufgaben oder verschiedene Darstellungsmerkmale). Die Anpassung der adaptiven Variable ist vor- oder während der Durchführung der Trainingseinheit möglich (Gerbaud et al., 2009). Die Anpassung vor der Durchführung der Trainingseinheit, auch „Parametrisierung“ genannt, bezieht sich auf die Abstimmung der Parameter und kann auf Vorkenntnissen, Niveau, Vorlieben und Erfahrungen der Trainierenden bzw. des Trainierenden basieren. Die Anpassung während des Trainings passt die Trainingsinhalte über Leistungsmessungen in Echtzeit dynamisch von selbst an. Daher wird es „dynamische Anpassung“ genannt und ist eine effiziente und attraktive Möglichkeit, um adaptive VR-basierte Trainingsumgebungen zu entwickeln.

Die Vorteile des adaptiven Trainings lassen sich auch durch verschiedene Theorien und Modelle erklären, darunter das Yerkes-Dodson-Law (Yerkes & Dodson, 1908) und die cognitive load theory (CLT) (Sweller, 1988).

Nach dem Modell von Yerkes-Dodson-Law besteht zwischen der physiologischen oder mentalen Aktivierung und der Leistungsfähigkeit der Lernerin bzw. des Lernalters ein umgekehrt U-förmiger Zusammenhang. Die Steigerung des Erregungsniveaus führt zu einer Erhöhung der Leistung bis zu einem Maximalwert. Ab diesem Wert sinkt bei Erhöhung des Erregungsniveaus die Leistung wieder ab. Basierend auf dem Yerkes-Dodson-Law kann adaptives Training ein optimales Niveau physiologischer oder mentaler Erregung bieten, um die Leistung und das Lernen der Trainierenden bzw. des Trainierenden zu maximieren. Auf der anderen Seite kann nicht-adaptives Training die Leistung aufgrund niedrigem (Langeweile) oder hohem (erhöhte Angst) Erregungsniveau beeinträchtigen (Bian et al., 2016).

Die CLT basiert auf dem Modell der menschlichen Gedächtnisarchitektur von Baddeley (1992) und geht davon aus, dass die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses begrenzt ist. Die CLT unterscheidet drei Arten von Arbeitsspeicherauslastungen. Sweller (1988) beschreibt die durch die Art des Lernmaterials verursachte Belastung als intrinsische Belastung (intrinsic Load). Diese Belastung steigt mit der Anzahl der Elemente, die gleichzeitig im Arbeitsspeicher vorhanden sind, wobei das Ausmaß der intrinsischen Belastung auch

vom Kenntnisstand der Lernerin bzw. des Lernalters abhängt. Die zweite in der CLT angegebene Belastung ist die extrinsische Belastung (extraneous Load). Diese kann direkt durch das Instruktionsdesign des Lernmaterials beeinflusst werden. Der kognitive Aufwand, der mit der Automatisierung von Schemata verbunden ist, resultiert auch in der lernbezogenen Belastung (germane Load). Basierend auf dem CLT und damit das Training effektiv ist, sollte die intrinsische Belastung (z.B. die inhärente Komplexität der Informationen) kontrolliert, die externe Belastung reduziert (z.B. durch Verwendung eines geeigneten Trainingsmediums) und die germane Belastung erhöht werden (z.B. durch Erhöhung der Trainingsvariabilität) (Zahabi & Razak, 2020). Die Überwachung der kognitiven Belastung und Erregung erfolgt mithilfe physiologischer Messungen in Echtzeit. Beispielsweise erwähnt die Literatur Eye-Tracking-Messungen wie Pupillengröße und Blinzelrate als robuste Maße der kognitiven Belastung (Abich et al., 2013). Darüber hinaus kann die Herzfrequenzvariabilität (HRV) mithilfe von intelligenten Uhren überwacht werden, um während des Trainings Echtzeitinformationen über den individuellen Erregungsgrad zu liefern (Zahabi et al., 2020).

Die Forschungsergebnisse bezüglich der Effektivität von adaptiven Trainingsumgebungen im Vergleich zu randomisierten Umgebungen zeigen überwiegend positive Befunde. (Bauer et al., 2012; Corbalan et al., 2008). Auch wenn derzeit wenig über virtuelle adaptive Trainingsumgebungen bekannt ist, deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Personalisierung virtueller Umgebungen eine Reihe von Vorteilen mit sich bringen könnte, die schon seit längerem aus der Spieleindustrie bekannt sind (Charles et al., 2005).

Zahabi und Razak (2020) sind durch ihre umfangreiche Recherche zum Schluss gekommen, dass VR-basiertes adaptives Training dem nicht-adaptiven Training insofern überlegen ist, als es die Aufgabenleistung, die Effizienz (weniger Zeitaufwand für das Training), die Effektivität (besseres Verständnis von Fehlern), die kognitive Funktionsweise und die Bereitschaft zu VR-Aktivitäten verbessert. Die Mehrheit der Studien im Bereich des adaptiven Trainings verwendete jedoch aufgrund ihrer Zugänglichkeit und Kosten nichtimmersive VR-Systeme. Nur wenige Studien setzten immersive VR-Systeme mit HMDs ein. Auch die Stichprobengrößen waren meist klein (<10) (Zahabi & Razak, 2020).

Um verallgemeinerbare Aussagen treffen zu können, sehen die Autoren einen Bedarf an Studien, die die Effektivität von adaptiven VR-basierten Trainings mit vollimmersiven Technologien, mit größeren Stichproben und mit Längsschnittdesigns evaluieren (Zahabi & Razak, 2020).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die adaptiven Gestaltungsmöglichkeiten von virtuellen Umgebungen vielfältig sind. Die Vielfalt bezieht sich dabei sowohl auf Leistungsmessungen als auch auf adaptive Variable und adaptive Logik. Leistungsmessungen können sich von Profilinformatoren bis zu physiologischen Messungen oder Kombinationen davon erstrecken. Algorithmen, die der adaptiven Logik zu Grunde liegen, können komplexe Formen annehmen, wie z. B. ANN und SVM. Dennoch werden oft – wie in Studie 3 dieser Arbeit – einfache regelbasierte Systeme verwendet, um den Einstieg in VR-basierte adaptive Trainingssysteme zu finden. Die Berücksichtigung mehrerer adaptiver Variablen und der Einsatz komplexer adaptiver Algorithmen können neue Potenziale für die effiziente Nutzung virtueller Umgebungen erschließen.

1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen der Dissertation

Die im Abschnitt 1.2.1 beschriebenen theoretischen Grundlagen und technologischen Entwicklungen weisen auf eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten von VR-Umgebungen für Lern- und Trainingszwecke hin und werfen neue Fragestellungen für die psychologische und pädagogische Forschung auf. Im Vordergrund stehen dabei die Fragen, unter welchen Bedingungen virtuelle Umgebungen lernfördernd sein können, wann sie zu besseren Ergebnissen führen und wie diese 3-D-Umgebungen zu optimieren sind. Um diese Fragestellungen zu beantworten, bedarf es einer grundlegenden Auseinandersetzung mit förderlichen und hinderlichen Aspekten in den Versuchsumgebungen, die technologischen Variationen gegenüberstehen.

Aufgrund der dreidimensionalen Darstellungen und der egozentrischen Wahrnehmung wäre der Einsatz von immersiver VR-Technologie vor allem für Bereiche mit räumlichen Zusammenhängen zu erwägen. In der hier vorgelegten Arbeit steht die Erfassung und Förderung einer Facette des räumlichen Vorstellungsvermögens, des MRA, im Vordergrund. Der für die Erfassung von MRA bereits mehrfach validierte, auf Paper-Pencil basierende MRT eignet sich besonders gut, um in eine virtuelle Umgebung integriert und durch die Einbeziehung von natürlichen Benutzerschnittstellen mit verschiedenen Interaktionsmöglichkeiten angereichert zu werden. Ausgehend vom Ansatz der Embodied Cognition sollen solche Interaktionen kognitive Prozesse unterstützen und erleichtern. Auch das Training der MRA auf der Grundlage einer solchen Umgebung erscheint vielversprechend und sollte auf seine Wirksamkeit in einer experimentellen Umgebung getestet und validiert werden. Basierend auf diesen Überlegungen besteht das Hauptziel dieser Arbeit darin, Erkenntnisse über die Erfassung und optimale Förderung der mentalen Rotationsfähigkeit mittels VR zu gewinnen. Dabei ist neben der exemplarischen Implementierung und Erprobung entsprechender Umgebungen die Erforschung von förderlichen und hinderlichen Einflussfaktoren von großer Bedeutung. Ausgehend vom Hauptziel werden in der Arbeit weitere Unterziele formuliert, die im Folgenden beschrieben werden.

Im Rahmen der Arbeit wurde zunächst das Ziel gesetzt, MRA mit den Technologien verschiedener Immersionsgrade zu untersuchen und zu klären, ob die Lösung von 3-D-MRT-Aufgaben in vollimmersiven Umgebungen im Vergleich zu nicht- oder teilimmersiven Umgebungen begünstigt wird und zu besseren Lösungsraten führt. In diesem Zusammen-

hang war es auch wichtig, nach Faktoren zu suchen, die mentale Rotationen in VR-Räumen zusätzlich beeinflussen. Ausgehend von bisherigen Forschungen (siehe Kapitel 1.2.2) sind das Geschlecht und der IQ signifikante Faktoren für MRA und wurden auch in dieser Arbeit intensiv untersucht. Vor dem Hintergrund dieser Zielsetzung wurden folgende Forschungsfragen (FF) abgeleitet:

- Hängen die im 3-D-MRT erzielten Testergebnisse vom Immersionsgrad der Technologie ab? (FF1)
- Gibt es einen Zusammenhang zwischen den im 3-D-MRT erzielten Testergebnissen und dem IQ der Lernenden? (FF2)
- Gibt es geschlechtsspezifische Unterschiede bei der mentalen Rotation in virtuellen 3-D-Testumgebungen? (FF3)

Vollimmersive virtuelle Umgebungen bieten den Nutzerinnen und den Nutzern eine Vielzahl von Interaktionsmöglichkeiten. Neben der Interaktion mit Controllern ist auch die Interaktion über natürliche Benutzerschnittstellen möglich, z. B. mithilfe der Leap Motion Technologie, wodurch eine realistische Auseinandersetzung mit den dreidimensionalen Figuren ermöglicht wird. Die Auswirkung realistischer Interaktionsmöglichkeit im vollimmersiven VR auf die MRA wurde auch im Rahmen dieser Arbeit als eine Zielsetzung in Betracht gezogen. Darüber hinaus wurde beabsichtigt, ein schwierigkeitsbestimmendes Merkmal von virtuellen MRT-Figuren zu identifizieren, um dieses als adaptive Variable zu nutzen und so ein adaptives Trainingsdesign zu realisieren. Ein weiteres Unterziel der Arbeit war es, die Testbarkeit von MRA im virtuellen Setting zu untersuchen. Die Vergleichbarkeit des virtuellen MRT mit dem Paper-Pencil-MRT ist jedoch vorerst kritisch zu hinterfragen und muss auf Konstruktvalidität geprüft werden. Dies wäre u.a. durch die Ermittlung von Korrelationen mit dem Paper-Pencil-MRT möglich. Aus den beschriebenen Teilzielen der Arbeit lassen sich daher folgende Forschungsfragen ableiten:

- Wie wirkt sich die realitätsnahe Auseinandersetzung mit den dreidimensionalen Würfelfiguren auf die virtuelle MRT-Leistung aus? (FF4)
- Hängt die Schwierigkeit der virtuellen MRT-Aufgaben von der Komplexität der enthaltenen Figuren (Anzahl der Quader) ab? (FF5)

- Wie hängt die mit dem Paper-Pencil-MRT gemessene Fähigkeit mit der mit dem virtuellen MRT gemessenen Fähigkeit zusammen? (FF6)

Beruhend auf den oben beschriebenen theoretischen Grundlagen und dem Forschungsstand kann davon ausgegangen werden, dass eine adaptive Gestaltung der virtuellen Trainingsumgebung zu einer höheren Effektivität des Trainings führen könnte, deren Untersuchung das dritte Hauptziel der Arbeit darstellt. Zu diesem Zweck wurde ein Trainingskonzept entwickelt, das sowohl direkte Interaktionen als auch ein adaptives Design als unterstützende Maßnahme beinhaltet. Das adaptive Design ermöglichte es den Personen, personalisierte und an ihre Fähigkeiten angepasste Trainingselemente zu erhalten, um die kognitive Belastung zu reduzieren und das Training effektiver zu gestalten. Die Effektivität der adaptiven Umgebung wurde durch den Vergleich mit einer randomisierten Umgebung getestet, was zu folgenden Forschungsfragen führte:

- Ist die virtuelle MRT-Leistung nach dem Training höher als vor dem Training? (FF7)
- Wie effektiv ist adaptives VR-basiertes mentales Rotationstraining im Vergleich zu einer randomisierten Trainingsumgebung? (FF8)
- Unterscheiden sich Personen in der adaptiven Bedingung von Personen in der randomisierten Bedingung in Bezug auf die kognitive Belastung? (FF9)
- Gibt es geschlechtsspezifische Unterschiede in Bezug auf die virtuelle MRT-Leistung und/oder die kognitive Belastung? (FF10)

Zur Beantwortung der einzelnen Forschungsfragen (FF1-FF10) wurden drei Studien in VR-basierten Umgebungen durchgeführt, deren Entwicklung im folgenden Unterkapitel näher beschrieben wird.

1.4 Entwicklung von VR-basierten Versuchsumgebungen

Die Software in allen drei Studien dieser Arbeit wurde mit der Game Engine Unity3D und der Programmiersprache C# realisiert. Unity3D ermöglicht es, die virtuellen 3-D-Umgebungen unabhängig vom Endgerät zu konstruieren und durch Anpassungen in den späteren Entwicklungsschritten technologiespezifische Anwendungen zu erstellen. Auf diese Weise ist es einfacher, möglichst ähnliche nichtimmersive, teilimmersive und voll-immersive virtuelle Umgebungen zu realisieren und ihre Vergleichbarkeit zu untersuchen. Die erste Studie dieser Arbeit befasst sich mit einem solchen Vergleich von virtuellen Umgebungen. Zu diesem Zweck wurde für jede Bedingung eine eigene Unity-Anwendung erstellt, sodass für Studie 1 insgesamt drei Anwendungen zur Verfügung standen (Desktop, Samsung Gear, HTC VIVE). In der zweiten Studie gab es entsprechend der Anzahl der Phasen zwei Anwendungen (Testphase und Trainingsphase) und in der dritten Studie drei Anwendungen (virtueller MRT, randomisiertes Training, adaptives Training). Jede Anwendung enthielt aneinander gekoppelte Szenen, die den einzelnen Items der virtuellen MRT-Aufgaben zugeordnet werden konnten. Generell waren die Szenen in allen Studien ähnlich und relativ einfach gehalten, um eine Ablenkung von den eigentlichen Aufgaben zu vermeiden. In jeder Szene wurden nur die Instruktionstafel, mentale Rotationsfiguren und später, in der zweiten und dritten Studie, die eigenen Hände des Probanden gezeigt. Im Folgenden sind die Softwarespezifikationen für die verschiedenen Studien einzeln beschrieben.

Software in der Studie 1

Die Grundstruktur der Software in Studie 1 war eine Reihe von sequenziellen Szenen, die 3-D-MRT-Items repräsentierten. Ein Item bestand aus zwei Würfelfiguren, die in Blender modelliert und als .fbx-Datei nach Unity3D übertragen worden war. Zu jeder Szene war eine CS-Datei zugeordnet, die Interaktionsmöglichkeiten, Speicherung von Daten und Szenenwechsel regelte.

In Studie 1 wurde die nichtimmersive Umgebung mit einem Laptop, die teilimmersive Umgebung mit Samsung Gear VR und die vollimmersive Umgebung mit der VR von HTC VIVE realisiert. Je nach Technologie konnten die Probanden ihre Entscheidung, ob zwei gezeigte Würfelfiguren gleich oder ungleich sind, durch Drücken einer Taste auf der Tastatur oder einer Taste auf dem Controller registrieren, woraufhin die Szene zur nächsten Szene wechselte. Für jede Szene wurde das Ereignis, welche Taste gedrückt wurde,

in einer Textdatei gespeichert, die für die jeweilige Probandin bzw. den jeweiligen Probanden neu generiert wurde. In der Textdatei wurde außerdem die Bearbeitungszeit bei den einzelnen Items Millisekunden genau gespeichert. Als Beispiel ist der Code für die erste Szene der nichtimmersiven Bedingung in Abbildung 3 dargestellt:

```
using System.Collections.Generic;
using UnityEngine;
using UnityEngine.SceneManagement;

public class Changescene1 : MonoBehaviour {
    public static string[] MyString = new string[21];
    // Use this for initialization
    void Update () {
        if (Input.GetKeyDown(KeyCode.Mouse0))
        {
            UnityEngine.SceneManagement.SceneManager.LoadScene("scene2");
            MyString[1] = (" Scene 1, Yes was pressed." +
                System.DateTime.Now.ToString("yyyy-MM-dd HH:mm:ss.fff") + System.Environment.NewLine);
        }
        if (Input.GetKeyDown(KeyCode.Mouse1))
        {
            UnityEngine.SceneManagement.SceneManager.LoadScene("scene2");
            MyString[1] = (" Scene 1, No was pressed." +
                System.DateTime.Now.ToString("yyyy-MM-dd HH:mm:ss.fff") + System.Environment.NewLine);
        }
    }
}
```

Abbildung 3: Beispielcode aus der nichtimmersiven Bedingung von Studie 1

Software in Studie 2

Die Software in der Studie 2 wies einige Ähnlichkeiten mit der Software in Studie 1 auf und hatte darüber hinaus etliche Erweiterungen. Die beiden Test- und Trainingsanwendungen bestanden ebenfalls aus den verknüpften Szenen und den dazugehörigen CS-Dateien, jedoch waren die Interaktionsmöglichkeiten und die gespeicherten Log-Daten wesentlich komplexer als in Studie 1. Die hier verwendete HTC VIVE- und Leap Motion-Technologie ermöglichte es, die Würfelfiguren nicht nur zu betrachten, sondern auch direkt mit der Hand auszuwählen (in Anwendung 1, erste Phase) oder sogar zu drehen (in Anwendung 2, zweite Phase). Dazu wurde das Leap Motion Asset in das Unity3D-Projekt integriert, das durch die vorprogrammierten Funktionen eine einfache Möglichkeit bietet, Hände in eine Unity3D-Umgebung zu integrieren. Dementsprechend komplex waren die CS-Dateien. Im Code der zweiten Phase wurde z.B. überprüft, ob der Drehwinkel der gedrehten Figur mit dem Drehwinkel der Zielfigur übereinstimmt. War dies der Fall, wurde die Farbe der Figur geändert, was als Feedback für die Probandinnen bzw. den Probanden diente. Als Log-Daten wurden in der ersten Phase die ausgewählten Elemente und die Ereigniszeit gespeichert, in der zweiten Phase zusätzlich zu den interagierenden Elementen auch die Drehrichtungen der Figuren in der x, y- und z-Achse.

Software in der Studie 3

Die für die Studie 3 programmierte Software war der in Studie 2 verwendeten Software sehr ähnlich. Der Unterschied war hier ein umfangreicher Item-Pool, der aus Aufgaben unterschiedlicher Schwierigkeitsgrade bestand sowie eine adaptive bzw. randomisierte Logik, die die Auswahl der nächsten Szene in der Trainingsphase regelte. In der adaptiven Bedingung wurde nach jedem Item überprüft, ob die Aufgabe korrekt gelöst wurde. War dies der Fall, wurde der Schwierigkeitsgrad erhöht und ein Item höherer oder gleicher Kategorie gewählt. Wurde das Item nicht gelöst, wurde der Schwierigkeitsgrad des nächsten Items reduziert. Die gespeicherten Daten waren hier die gleichen wie in Studie 2: in der Testphase die ausgewählten Figuren und Ereigniszeiten und in der Trainingsphase zusätzlich auch die Drehrichtungen.

Die automatische Speicherung der Daten vom System sowie die direkt im virtuellen Raum angezeigten Anweisungen reduzierten den Aufwand für die Durchführung der drei Experimente. Allerdings war die Installation der vollimmersiven HTC VIVE-Technologie recht zeitaufwändig. Auch die Nachbearbeitung und Analyse der Daten mit den Statistikprogrammen SPSS und R nahm viel Zeit und Arbeit in Anspruch. Durch die Integration der automatisierten Datenanalysefunktionen in die Software ist es möglich, die Datenauswertungsprozesse in zukünftigen Studien zu beschleunigen. Mit der neuen Technologie der HTC VIVE (HTC VIVE Focus) kann die Durchführung zukünftiger Experimente zusätzlich erleichtert werden, da die Installation von Infrarotkameras und der Anschluss des HMD an den PC mit einem Kabel wegfallen.

1.5 Verknüpfung der Veröffentlichungen

Ausgehend von der im Unterkapitel 1.3 formulierten Zielsetzung wurden im Rahmen der Bearbeitung drei aufeinander folgende Studien realisiert, die die mentale Rotationsfähigkeit in virtuellen Räumen untersuchten. Die Studien wurden im Zeitraum von 2018 bis 2020 durchgeführt. Insgesamt nahmen 415 Probanden an den Studien teil. Ein Teil dieser Personen bestand aus Schülerinnen und Schülern (Studie 1 und 2), einige waren Studierende (Studie 2 und 3) und ein kleiner Teil der Teilnehmerinnen und Teilnehmer war berufstätig (Studie 2 und 3).

Um zu ermitteln, welche VR-Technologie für die Erfassung und die Förderung der MRA am besten geeignet ist, wurden in Studie 1 drei verschiedene Technologien verglichen: die vollimmersive VR-Technologie von HTC VIVE, die teilimmersive VR-Technologie von Samsung Gear und die nichtimmersive Technologie Desktop-PC (FF1). Da die Vor- und Nachteile der gewählten Technologie von der Gruppenzugehörigkeit und den Vorkenntnissen der Anwenderin bzw. des Anwenders abhängen können, wurden in Studie 1 sowohl die technologischen Varianten als auch die unterschiedlichen Ausprägungen der relevanten Einflussfaktoren betrachtet und gegenübergestellt. Nach bisherigen Untersuchungen sind Geschlecht (FF3) und Intelligenz (FF2) die wichtigsten Faktoren, die die mentale Rotation beeinflussen. Ob diese auch bei einer egozentrischen Darstellung der mentalen Rotationsaufgaben relevant bleiben, ist unklar und wurde in der Studie 1 durch eine Gegenüberstellung der bildschirmbasierten und der HMD-basierten 3-D-MRT-Aufgaben untersucht. Der weitere Vergleich vollimmersiver, teilimmersiver und nichtimmersiver Umgebungen sollte zudem zusätzliche Aufschlüsse darüber geben, ob allein die egozentrische Präsentation der Aufgaben entscheidend ist oder ob die erweiterten Betrachtungsmöglichkeiten vollimmersiver Umgebungen wie z. B. die Perspektivenänderung durch die Positionsänderung die Bearbeitung der mentalen Rotationsaufgaben beeinflussen.

In Studie 1 waren die virtuellen MRT-Items mit den MRT-Items von Shepard und Metzler (1971) vergleichbar und unterschieden sich von den Items der zweiten und dritten Studie, die auf den MRT-Items von Vandenberg und Kuse (1978) basierten. Während die Probanden in den Tests der späteren Studien vier Würfelfiguren mit einer Zielfigur vergleichen und zwei der gleichen Form auswählen mussten, bestand die Aufgabe in der ersten Studie darin, jeweils zwei Figuren zu vergleichen und zu entscheiden, ob sie gleich

oder ungleich waren. Dies führte zu einer sehr hohen Ratewahrscheinlichkeit der Testfiguren aus der ersten Studie (50 %) und wirkte sich negativ auf die Genauigkeit der Ergebnisse aus. Die Ratewahrscheinlichkeit war auch in den Tests der zweiten und dritten Studie vorhanden, war jedoch deutlich geringer als in der ersten Studie, da die Probanden wie im MRT von Vandenberg und Kuse (1978) zwei richtige Antworten aus vier möglichen Antworten auswählen mussten.

Die Interaktionsmöglichkeiten mit den mentalen Rotationsfiguren waren in der Studie 1 aufgrund der Gewährleistung der Vergleichbarkeit verschiedener technologischer Varianten begrenzt. In allen drei Umgebungen hatten die Personen lediglich zu entscheiden, ob die dreidimensionalen Figurenpaare gleich oder ungleich waren, und ihre Reaktion durch Drücken einer Taste (Controller oder Maus) zu registrieren. In der zweiten und dritten Studie wurde ausschließlich die HTC VIVE VR-Technologie zur Förderung der mentalen Rotationsfähigkeit eingesetzt. In diesen Studien erlaubten es die manuellen Interaktionen den Versuchspersonen, die Position und Rotation der dreidimensionalen Figuren zu verändern, um die Rotation besser nachvollziehen zu können und so ihre MRA zu verbessern (FF4, FF7). Zur Prüfung der Verbesserungsleistung nach dem Training wurde neben dem Paper-Pencil-MRT auch der virtuelle MRT eingesetzt. Dieser Test wurde ebenfalls in der zweiten Studie entwickelt und durch Vergleich mit dem Paper-Pencil-Test validiert, um schließlich in der Studie 3 eine papierlose Messung der Fähigkeitssteigerung zu ermöglichen (FF6). Mit der Studie 2 sollte außerdem ein schwierigkeitsbestimmendes Merkmal von mentalen Rotationsaufgaben – die Anzahl der Würfel in den 3-D-Figuren – erprobt werden (FF5). Die Bestimmung der Schwierigkeit der Items sollte der Entwicklung einer adaptiven Förderumgebung dienen, die anschließend in Studie 3 realisiert und untersucht wurde. Die adaptive Gestaltung der Trainingsumgebung sollte durch die Berücksichtigung des Lösungsverhaltens und die Anpassung der Aufgabenschwierigkeit zu einer höheren Trainingseffizienz und letztlich zu mehr Fähigkeitssteigerung führen (FF8). Im Gegensatz zu den ersten beiden Studien behandelte Studie 3 die subjektiv gemessene kognitive Belastung im Zusammenhang mit mentalem Rotationstraining, da adaptive Umgebungen oft auf der Theorie der kognitiven Belastung (Cognitive Load Theory; Sweller, 1988) basieren. Nach dieser Theorie sollte die kognitive Belastung in der adaptiven Bedingung niedriger sein als in der randomisierten Bedingung (FF9). Darüber hinaus greift die Studie 3 die geschlechtsspezifischen Unterschiede in der mentalen Rotationsfähigkeit wieder auf und untersucht diese im Kontext der adaptiven Förderung (FF10). Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Studie 1 sollten Personen

mit geringer mentaler Rotationsfähigkeit, vor allem Frauen, stärker von dieser Unterstützungsmöglichkeit profitieren. Die Studien bauten insgesamt bezüglich der behandelten Forschungsfragen und der methodischen Vorgehensweise sinnvoll aufeinander auf.

Auch die virtuellen Umgebungen für die Tests bzw. Trainings sind zwischen den drei Studien miteinander verknüpft. Die Realisierung der VR-Software in allen drei Studien basierte auf der Game Engine Unity3D, welche die Möglichkeit bietet, VR-Umgebungen zunächst technologieunabhängig zu entwickeln und erst in einem zweiten Schritt als technologiespezifische Anwendungen aufzubauen. Die mentalen Rotationsfiguren wurden mit der 3-D-Software Blender konstruiert und als .fbx-Dateien in Unity3D-Szenen integriert, um sie mit Interaktionsmöglichkeiten anzureichern. Während in der ersten Studie die Interaktionsmöglichkeiten auf Perspektivwechsel und Tastendrücke beschränkt waren, wurden diese in der zweiten Studie komplexer gestaltet: Hier konnten die Probandinnen und Probanden nicht nur mit einem Controller oder einer Maus Aktionen ausführen, sondern auch mittels der Leap Motion Technologie die eigenen Hände verwenden, um mit virtuellen Objekten auf realistische Weise zu interagieren. Die Trainingsumgebung sowie die Interaktionsmöglichkeiten in Studie 3 waren identisch mit der zweiten Studie. Dennoch gab es wichtige Softwareerweiterungen, nämlich die zu Grunde liegende Logik für adaptive und randomisierte Bedingungen sowie der Gesamtbestand des Item-Pools. Der Trainingshintergrund wurde in allen drei Studien sehr schlicht gehalten, um mögliche Störvariablen zu vermeiden. Abgesehen von den 3-D-Figuren war nur die Instruktionstafel im Hintergrund sichtbar, auf der die jeweiligen Anweisungen stets präsent waren. Die 3-D-Figuren sind etwas größer als das Handmodell und erscheinen den Testpersonen in einem Schwebezustand.

Die durchgeführten Studien bauen inhaltlich aufeinander auf, gleichzeitig fokussieren die einzelnen Studien individuelle Forschungsfragen. Tab. 1 gibt einen Überblick über die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Studien und verdeutlicht die systematische Vorgehensweise. Während die ersten beiden Studien Erkenntnisse und Materialien für Studie 3 generieren, besteht das Ziel der dritten Studie darin, die Ergebnisse der vorangegangenen Studien zu nutzen, um eine optimierte adaptive virtuelle Umgebung für das Training mentaler Rotationsfähigkeiten zu entwickeln und zu erproben. Die verwendete Trainingsumgebung erweist sich jedoch längst nicht als ideal und zeigt Weiterentwicklungspotentiale auf. Die Limitationen sowie über die Arbeit hinausgehende Forschungsdesiderate werden im Diskussionsteil behandelt.

Tab. 1: Übersichtsdarstellung der im Rahmen der Arbeiten durchgeführten Studien zur Erfassung und adaptiven Förderung von MRA durch VR

	Durchgeführte Studien		
Name des Beitrags	Virtuelle Umgebungen zur Analyse der mentalen Rotationsfähigkeit	Training of mental rotation ability in virtual spaces	Adaptive training of the mental rotation ability in an immersive virtual environment
Forschungsfragen	<p>Hängen die im 3-D-MRT erzielten Testergebnisse vom Immersionsgrad der Technologie ab? (FF1)</p> <p>Gibt es einen Zusammenhang zwischen den im 3-D-MRT erzielten Testergebnissen und dem IQ der Lernenden? (FF2)</p> <p>Gibt es Geschlechtsunterschiede bei der mentalen Rotation in virtuellen 3-D-Testumgebungen? (FF3)</p>	<p>Wie wirkt sich die realitätsnahe Auseinandersetzung mit den dreidimensionalen Würfelfiguren auf die virtuelle MRT-Leistung aus? (FF4)</p> <p>Hängt die Schwierigkeit der virtuellen MRT-Aufgaben von der Komplexität der enthaltenen Figuren (Anzahl der Quader) ab? (FF5)</p> <p>Wie hängt die mit dem Paper-Pencil-MRT gemessene Fähigkeit mit der mit dem virtuellen MRT gemessenen Fähigkeit zusammen? (FF6)</p>	<p>Ist die virtuelle MRT-Leistung nach dem Training höher als vor dem Training? (FF7)</p> <p>Wie effektiv ist adaptives VR-basiertes mentales Rotationstraining im Vergleich zu einer randomisierten Trainingsumgebung? (FF8)</p> <p>Unterscheiden sich die Personen in den verschiedenen Bedingungen hinsichtlich der kognitiven Belastung? (FF9)</p> <p>Gibt es Geschlechtsunterschiede hinsichtlich der Leistung im virtuellen MRT und/oder der kognitiven Belastung? (FF10)</p>
Verwendete Technologie	<p>Laptop-Display (nichtimmersiv)</p> <p>HMD von Samsung Gear (teilimmersiv)</p> <p>HTC VIVE VR-Technologie (vollimmersiv)</p>	HTC VIVE VR-Technologie (vollimmersiv)	HTC VIVE VR-Technologie (vollimmersiv)
Forschungsmethode	Experimentelle Studie mit „between subjects design“. Als between subjects Faktor wurde der Grad der Immersivität variiert, welcher mithilfe von verschiedenen Technologien manipuliert wurde.	Studie mit einem Prä-Test-Post-Test-Design. Zwischen dem Prä-Test und dem Post-Test fanden zwei virtuelle Phasen statt.	Studie mit Prä-Test-Post-Test Experimental-Kontrollgruppen-Design. Als Experimentalbedingung diente das adaptive Training und als Kontrollbedingung das randomisierte Training.
Stichprobe	213 Schülerinnen und Schüler	100 Schülerinnen und Schüler, Studierende und Berufstätige	102 Studierende und Berufstätige

Abhängige Variablen	Anzahl von korrekt gelösten Aufgaben in 3-D-MRT	Anzahl von korrekt gelösten Aufgaben in Paper-Pencil-MRT Anzahl von korrekt gelösten Aufgaben im virtuellen MRT	Anzahl von korrekt gelösten Aufgaben im virtuellen MRT Cognitive Load gemessen mit dem NASA TLX
Zentrale Ergebnisse	<p>Die Immersivität der Umgebung hat einen partiellen Einfluss auf die Leistung im 3-D-MRT: kein Unterschied zwischen vollimmersiven und nichtimmersiven Bedingungen; In der teilimmersiven Bedingung wurden höhere Testwerte erzielt als in der nichtimmersiven Bedingung.</p> <p>Die Leistung im 3-D-MRT korreliert in der nichtimmersiven und teilimmersiven Bedingung positiv mit dem IQ, nicht aber in der vollimmersiven Bedingung.</p> <p>Geschlechtsspezifische Unterschiede im 3-D-MRT sind nur in der vollimmersiven Bedingung vorhanden.</p>	<p>MRA (gemessen mit virtuellem MRT) verbessert sich nach der Auseinandersetzung mit den dreidimensionalen Würfelfiguren.</p> <p>Die Schwierigkeit der virtuellen MRT-Aufgaben hängt mit der Komplexität der Figuren (Anzahl der Quader) zusammen.</p> <p>Es besteht eine hohe positive Korrelation zwischen Paper-Pencil-MRT und virtuellem MRT.</p>	<p>MRA (gemessen mit virtuellem MRT) verbessert sich nach virtuellem Training.</p> <p>MRA (gemessen mit virtuellem MRT) verbessert sich in der adaptiven Bedingung stärker als in der randomisierten Bedingung (jedoch nur bei Männern).</p> <p>Hinsichtlich der kognitiven Belastung gibt es keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Bedingungen.</p> <p>Männer schneiden bei VMRT generell besser ab als Frauen und haben eine niedrigere kognitive Belastung.</p>

2 Publierte Originalarbeiten

Ariali, S. & Zinn, B. (2018). Virtuelle Umgebungen zur Analyse der mentalen Rotationsfähigkeit. *Journal of Technical Education (JOTED)*, 6(4), 7–29.

Ariali, S. (2020). Training of mental rotation ability in virtual spaces. *Journal of Technical Education (JOTED)*, 8(2), 46–63.

Ariali, S., & Zinn, B. (2021). Adaptive Training of the Mental Rotation Ability in an Immersive Virtual Environment. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, 16(09), 20–39.

2.1 Publikation 1

Virtuelle Umgebungen zur Analyse der mentalen Rotationsfähigkeit

ZUSAMMENFASSUNG: Moderne virtuelle Umgebungen bieten die Option, komplexe 3-D-Modelle aus multiplen Perspektiven erfahrbar zu machen und können damit grundsätzlich auch genutzt werden, um eine adaptive Förderung der mentalen Rotationsfähigkeit von Auszubildenden zu ermöglichen. Bislang weiß man aber zu den Einsatzmöglichkeiten virtueller Umgebungen zur Analyse und Förderung der mentalen Rotationsfähigkeit, die einen zentralen Teil des räumlichen Vorstellungsvermögens einer Person bildet, wenig. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich im Rahmen einer grundlagenorientierten hypothesenprüfenden Studie mit der Erfassung der mentalen Rotationsfähigkeit von Jugendlichen ($N = 213$) in Abhängigkeit einer technologischen Testvariation. Die Befunde der experimentellen Studie belegen einen Zusammenhang zwischen der fluiden Intelligenz und der mentalen Rotationsfähigkeit. Dieser Zusammenhang wird von der Immersivität der Umgebung sowie vom Intuitive-Use der Technologie beeinflusst. Der Geschlechterunterschied in der mentalen Rotationsfähigkeit, die in den computerbasierten 3-D-Umgebungen gemessen wird, fällt deutlich schwächer aus als der Geschlechterunterschied in der mentalen Rotationsfähigkeit, die mittels herkömmlicher Paper-Pencil-Tests erfasst wird. Zudem deuten die Befunde darauf hin, dass die virtuellen Testumgebungen vorteilhaft für kognitiv schwächere Schülerinnen und Schüler sein können.

Virtual environments for the analysis of mental rotation ability

ABSTRACT: Modern virtual environments offer the option of experiencing complex 3-D models from multiple perspectives and can thus also be used to enable adaptive teaching of the mental rotation ability of trainees. So far, however, little is known about the application possibilities of virtual environments for analyzing and teaching of the mental rotation ability, which forms a central part of the spatial ability of a person. This article is part of a basic research hypothesis-testing study, which deals with the apprehension of mental rotation ability of adolescents ($N = 213$) in response to a technological test variation. The findings of the experimental study show a correlation between fluid intelligence and mental rotation ability. This relationship is influenced by the immersiveness of the environment as well as the intuitive use of the technology. The gender difference in mental rotation ability, as it is measured in the computer-based 3-D environments, is significantly weaker than the gender difference in the mental rotation ability measured by conventional

paper pencil tests. In addition, the findings indicate that the virtual test environments can be beneficial for cognitive weaker pupils.

1 Einleitung

Mit der dynamischen Verbreitung neuer Technologien und der fortschreitenden Digitalisierung der alltäglichen und beruflichen Welt sind grundlegende Wandlungsprozesse und vielfältige Potenziale zur Optimierung der beruflichen Aus- und Weiterbildung verbunden. Mit der Einbindung digitaler Technologien können innovative Lern- und Arbeitsumgebungen zur Flexibilisierung, Individualisierung sowie zur Analyse und Optimierung von Lehr- und Lernprozessen geschaffen werden, die dazu beitragen können, aktuelle Herausforderungen in der beruflichen Bildung zu mildern (vgl. Zinn 2017). In der Diskussion um die Nützlichkeit und Lernförderlichkeit der VR-Technologie wird davon ausgegangen, dass veränderte Formen der Mensch-Technik-Interaktion im Bezugsfeld der Verbindung virtueller Umgebungen (Virtual Reality, kurz VR) zu einer effizienteren Lern- und Arbeitsweise führen können, indem sie eine realitätsnahe Wahrnehmung der Umgebung ermöglichen und durch unterstützende Benutzerinformationen angereichert werden können (ebd.).

Besonders vorteilhaft wird der Einsatz von virtuellen Umgebungen im Aus- und Weiterbildungsbereich gesehen, wo sie neben einer realistischen Darstellung der Umgebung auch eine individualisierte und adaptive Förderung von Lernenden ermöglichen. Mit virtuellen Lern- und Arbeitsumgebungen können adaptive Komplexitätsreduzierungen vorgenommen und Förderangebote für Menschen mit physiologischen und/oder kognitiven Beeinträchtigungen entwickelt werden. Komplexe Zusammenhänge können dabei visualisiert werden und Nutzer können praktische Fähigkeiten trainieren, deren Training in den realen Umgebungen unmöglich, zu teuer oder gefährlich wäre (vgl. Schuster 2015; Zinn, Guo & Sari 2016; Zinn 2017). Um im Rahmen von Fördermaßnahmen auf den Einzelnen adaptiv einzugehen und eine individualisierte Unterstützung zu ermöglichen, scheinen geschützte virtuelle Lern- und Arbeitsumgebungen grundsätzlich hochinteressant. Verbunden ist dies mit der Erwartung, dass Jugendliche, die aufgrund ihrer individuellen Beeinträchtigung eine berufsspezifische Förderung (z. B. zum räumlichen Vorstellungsvermögen) benötigen, durch die Nutzung der Besonderheiten virtueller Umgebungen bessere Chancen erhalten und damit eine berufliche Ausbildung erfolgreich absolvieren können. Moderne virtuelle Lern- und Arbeitswelten bieten hierzu die Möglichkeit, eine adaptive

Lernumgebung für Benachteiligte aufzubauen und ein synästhetisches Lernen unter Berücksichtigung des Embodied-Cognition-Ansatzes (vgl. Barsalou 2008, S. 619) zu unterstützen.

Bislang gibt es zum Einsatz von virtuellen Umgebungen im Bereich der beruflichen Bildung sowohl zur Kompetenzanalyse als auch zur adaptiven Förderung von Jugendlichen noch wenige empirische Studien. Dies gilt auch für die Erfassung und Förderung der mentalen Rotationsfähigkeit mittels virtueller Umgebungen. In verschiedenen Berufsbereichen, wie beispielsweise der Architektur oder im Maschinenbau, wird die VR-Technologie zwar seit Längerem schon zur Planung und Visualisierung von Objekten eingesetzt (vgl. Vassigh et al. 2018), der empirische Forschungsstand zur Bildungsforschung ist aber auch in diesen Bereichen relativ dünn (siehe Abschnitt 2.1).

Die mentale Rotationsfähigkeit ist ein elementarer Bestandteil des räumlichen Vorstellungsvermögens, das meistens mithilfe von Paper-Pencil-basierten mentalen Rotations-tests erfasst wird und als eine der zentralen Voraussetzungen für die Entwicklung der Fachkompetenz in vielen technischen Berufen angesehen wird (vgl. Sorby 2009; Quaiser-Pohl & Endepohls-Ulpe 2010; Castro-Alonso & Uttal 2018). Insbesondere in den Aus- und Weiterbildungsberufen, in denen technische Zeichnungen fachsprachlich Verwendung finden (z. B. Produktionstechnologe, Maschinenbauer, Zimmerer oder Bautechniker), ist davon auszugehen, dass das räumliche Vorstellungsvermögen für die Entwicklung berufsfachlicher Kompetenzen von Relevanz ist. Die Analyse und Förderung des räumlichen Vorstellungsvermögens ist demnach eine wichtige Aufgabe der pädagogisch-psychologischen Forschung im skizzierten Bezugsfeld und bildet die Perspektive der vorliegenden Forschungsbemühung. Mit der Studie sollen anschlussfähige Erkenntnisse über die VR-gestützte Erfassung und adaptive Förderung der mentalen Rotationsfähigkeit generiert werden. Mithilfe technologisch varianter mentaler Rotationstests soll überprüft werden, (1.) ob die mentale Rotationsfähigkeit vom Immersionsgrad der Technologie abhängt, (2.) ob die erzielten Testwerte mit der fluiden Intelligenz der Lernenden korrelieren und (3.) ob und in welchem Ausmaß erwartungskonforme Geschlechterunterschiede in der mentalen Rotationsfähigkeit in den virtuellen 3-D-Testumgebungen bestehen. Hierzu werden im zweiten Abschnitt die theoretischen Grundlagen zur VR-Technologie sowie zu den theoretischen Konstrukten und der Forschungsstand berichtet. Im dritten Abschnitt werden die Hypothesen der Studie hergeleitet. Im vierten Abschnitt wird das methodische

Vorgehen der Studie erläutert und darauffolgend im fünften Abschnitt die Ergebnisse berichtet. Im sechsten Abschnitt werden die Ergebnisse zusammengefasst und die zentralen Befunde diskutiert, bevor abschließend Anknüpfungspunkte für die weiterführende Forschung aufgezeigt werden.

2 Theoretischer Hintergrund und Forschungsstand

Nach einem Überblick zur eingesetzten VR-Technologie werden in diesem Abschnitt die untersuchungsrelevanten Konstrukte sowie der aktuelle Forschungsstand und die Rolle der immersiven Technologie im Bezugfeld des räumlichen Vorstellungsvermögens dargestellt.

2.1 VR-Technologie

Unter dem Begriff „Virtuelle Realitäten“ (VR) werden computergenerierte Echtzeit-Darstellungen von realen oder fiktiven Umgebungen verstanden, welche eine besondere Art der Mensch-Maschine-Interaktion ermöglichen, indem sie durch künstliche oder zunehmend auch natürliche Nutzerschnittstellen angereichert werden. Im Zentrum der VR steht das Erlebnis, an einem fremden Ort zu sein (vgl. Rheingold 1992). Laut Dörner und Kollegen stellt VR eine Metapher dar, die auf der Analogie der Realität aufbaut (vgl. Dörner et al. 2014). In einer hochimmersiven VR werden sämtliche Sinneseindrücke des Nutzers durch die VR-Technologie über die natürlichen Nutzerschnittstellen (engl. natural user interfaces, NUI) erzeugt. NUI haben allgemein das Potenzial, eine realitätsbezogene Navigation und Interaktion zu ermöglichen und damit eine authentischere Erfahrung zu vermitteln. Eine wichtige natürliche Nutzerschnittstelle der VR-Technologie ist das Head-Mounted-Display (HMD), die sogenannte „VR-Brille“. Das Hauptmerkmal von VR-Brillen ist das komplett geschlossene Gehäuse mit asphärischen Linsen, das am Kopf des Nutzers so befestigt wird, dass die Augen mit den Linsen verdeckt sind. Die Linsen sind so konzipiert, dass ein scharfes Sehen in Full-HD-Qualität gewährleistet wird (vgl. Thomas, Metzger & Niegemann 2018). Durch die Stereoskopie wird eine dreidimensionale Wahrnehmung der virtuellen Realität ermöglicht (vgl. Bleser 2017). Darüber hinaus werden weitere NUI (vgl. Datenhandschuh, Tracking) in den einzelnen Technologien verbaut. Im Folgenden werden die Technologien der HTC VIVE und Samsung Gear VR näher beschrieben, da sie in der vorliegenden Studie verwendet werden.

Die HTC VIVE ist ein kombiniertes System aus Tracking und HMD. Das HMD ist dabei über Kabel oder per WLAN mit einem PC verbunden, in dem die VR-Anwendung läuft. Die beiden Controller sind kabellos. HTC VIVE nutzt ein auf der Lighthouse-Technologie basierendes optisches Trackingsystem, bei dem zwei Basisstationen an gegenüberliegenden Seiten des Raums platziert werden (vgl. Hagen 2017). Mithilfe von integrierten Infrarot-LEDs und zwei Lasern, jeweils einer für die vertikale und horizontale Achse, lässt sich durch die Basisstationen eine Fläche von 5 x 5 Metern abdecken, auf der sich der Nutzer bewegen kann. Um die Position und Rotation des Nutzers zu registrieren, werden sowohl das HMD als auch die zwei Controller, jeweils einer pro Hand, ausgewertet. Über die Controller können die Nutzer mit den virtuellen 3-D-Objekten interagieren, Handlungen vornehmen und sich im virtuellen Raum bewegen. Es ist möglich, in der virtuellen Umgebung herumzulaufen, diese visuell und auditiv zu analysieren sowie 3-D-Objekte interaktiv zu manipulieren (vgl. Korgel 2017).

Die Samsung Gear VR wird hingegen nicht mit einem Personal Computer (PC), sondern mit dem Smartphone verbunden, das direkt in das HMD platziert wird. Das Smartphone ist über eine eingebaute Micro-USB-1.1-Verbindung mit der Gear VR verbunden. Dies hat den Vorteil, dass sie räumlich flexibler ohne zusätzliche Gerätschaften kabellos verwendet werden kann. Zur Darstellung des virtuellen Szenarios wird das Display des Smartphones verwendet, wovon die Auflösung der virtuellen Umgebung abhängt (vgl. Korgel 2017). Für das Tracking der Kopfbewegung werden ein Beschleunigungsmesser und ein Gyroskop sowie Magnet- und Näherungssensoren verwendet (vgl. Hagen 2017). Die Position des Nutzers im virtuellen Raum kann bei dieser Technologie nicht registriert werden, was die natürliche Fortbewegung in einem VR-Raum einschränkt. Obwohl die Samsung Gear VR allgemein auch als eine immersive Technologie bezeichnet wird, kann man bei der HTC VIVE von einem höheren Grad an Immersion ausgehen, da den Nutzern eine natürliche Fortbewegungsmöglichkeit erlaubt wird und dabei Perspektivenwechsel bei der Betrachtung von virtuellen Objekten gegeben werden, was bei der Samsung Gear VR nicht möglich ist. Für die vorliegende Studie stufen wir daher die HTC VIVE als hochimmersiv und die Samsung Gear VR als teilimmersive Technologie ein (siehe hierzu auch Tab. 1).

Die Besonderheiten der beiden virtuellen Umgebungen liegen im Gegensatz zur desktop-basierten Darstellung (nicht immersive Technologie) darin, dass die Betrachtung der Um-

gebung für den Nutzer aus der egozentrischen Perspektive möglich ist, was einer realitätsnahen Wahrnehmung der Umgebung und ihrer Objekte entspricht (vgl. Dede 2009). Die Bewegungsmöglichkeit erlaubt zusätzlich die Wahrnehmung des Raumes und der Objekte aus unterschiedlichen Blickwinkeln und kann so dazu beitragen, die Verarbeitung räumlicher Informationen zu erleichtern. Bereits vor zwanzig Jahren kamen Pausch, Proffitt und Williams (1997) zu dem Schluss, dass das Training mithilfe von Desktop-PCs für die Entwicklung realitätsrelevanter Fähigkeiten eingeschränkt effizient sei und setzten daraufhin Vorläufer der immersiven Technologie in visuell-räumlichen Suchaufgaben ein. Die Ergebnisse von Pausch, Proffitt und Williams (1997) deuten darauf hin, dass sich mithilfe der neuen VR-Technologie entsprechende Aufgaben effizienter lösen lassen. Murcia-López und Steed (2016) zeigen ebenfalls, dass komplexe räumliche Wissensaufgaben in den virtuellen Umgebungen im Vergleich zu desktopbasierten Umgebungen mit einer höheren Quote gelöst werden. Dan und Reiner (2017) erklären dies damit, dass der Einsatz von immersiven virtuellen Umgebungen zu einer geringeren kognitiven Belastung sowie zu einer effizienteren Verarbeitung visueller Reize bei den Nutzern im Vergleich zu zweidimensional dargestellten Inhalten führt. Weiterhin deuten Studien darauf hin, dass Personen mit einem mangelnden räumlichen Vorstellungsvermögen von den immersiven virtuellen Umgebungen besonders profitierten (vgl. Dan & Reiner 2017). Zur Erklärung dieses Zusammenhangs kann die Überlastung des Gehirns durch eine Reihe von kognitiven Operationen, wie die mentale Rotation und die visuell räumliche Transformation, herangezogen werden, die bei den bildschirmbasierten Tätigkeiten notwendig sind, um einen Perspektivenwechsel auszuführen (vgl. Zacks & Michelon 2005). Die virtuelle Wahrnehmung ist streng egozentrisch und scheint auf einem impliziten, automatischen Kodierungsmechanismus zu beruhen (vgl. Nico & Daprati 2009), was möglicherweise die Informationsverarbeitung erleichtert. Die Option der VR-gestützten egozentrischen Wahrnehmung dreidimensionaler Objekte kann damit bedeutsam werden, um adäquate dreidimensionale mentale Abbilder des Lerninhalts zu konstruieren.

2.2 Einordnung der mentalen Rotationsfähigkeit

Die Erforschung der Intelligenz hat eine lange Tradition (vgl. Gruber & Stamouli 2009). Gruber und Stamouli (2009) definieren sie wie folgt: „Intelligenz ist die Fähigkeit eines Menschen zur Anpassung an neuartige Bedingungen und zur Lösung neuer Probleme auf der Grundlage vorangehender Erfahrungen im gesellschaftlichen Kontext“ (Gruber &

Stamouli 2009, S. 31). Manche Autoren gehen dabei von einem Generalfaktor der Intelligenz aus, bekannt als Sparmans g (vgl. Jensen 1998), andere wiederum (vgl. Cattell 1987; Thurstone 1938; Thurstone & Thurstone 1941) beschreiben mehrere Primärfaktoren der Intelligenz, wengleich sich die Trennung in (1.) fluide Intelligenz und (2.) kristalline Intelligenz in mehreren Modellen niederschlägt (vgl. Carroll 1993). Fluide Intelligenz wird dabei beschrieben als die Fähigkeit, komplexe logische Zusammenhänge und abstrakte Strukturen zu begreifen sowie vielfältige Informationen verfügbar zu halten und manipulieren zu können. Unter dem Begriff kristalline Intelligenz werden individuelle Unterschiede im verfügbaren und anwendbaren Wissen verstanden (vgl. Gruber & Stamouli 2009).

Neben der fluiden und kristallinen Intelligenz werden weitere Intelligenz-Konstrukte differenziert. Eine von Thurstones primären geistigen Fähigkeiten ist die räumliche Visualisierungsfähigkeit (vgl. Thurstone 1938). Vernon postuliert zwei breite Faktoren unter g , einen verbalen pädagogischen und einen räumlich-mechanischen Faktor (vgl. Vernon 1971). Auch Carroll (1993), der in seinem Modell die bisher untersuchten Aspekte der Intelligenz zusammenführt (Abb. 1), platziert den visuellen Wahrnehmungsfaktor in Schicht II seines Modells, erweitert sie jedoch mit spezifischeren Arten von räumlichen Fähigkeiten (z. B. Visualisierung, visuelle Wahrnehmungsgeschwindigkeit etc.), die in Schicht I aufgelistet sind. Carrolls Ansicht, dass die räumliche Fähigkeit kein einheitliches Konstrukt ist und in unterschiedliche Formen zerlegt werden kann, konnte durch darauffolgende Forschungsstudien bestätigt werden (vgl. Kaufmann 2007). Linn und Peterson (1985) sowie Voyer, Voyer und Bryden (1995) unterschieden drei Kategorien von räumlichen Fähigkeiten, die auf unterschiedlichen Prozessen basieren und zur Lösung verschiedener Aufgabentypen relevant sind. Die drei Kategorien sind (1.) die räumliche Wahrnehmung, (2.) die mentale Rotation und (3.) die räumliche Visualisierung.

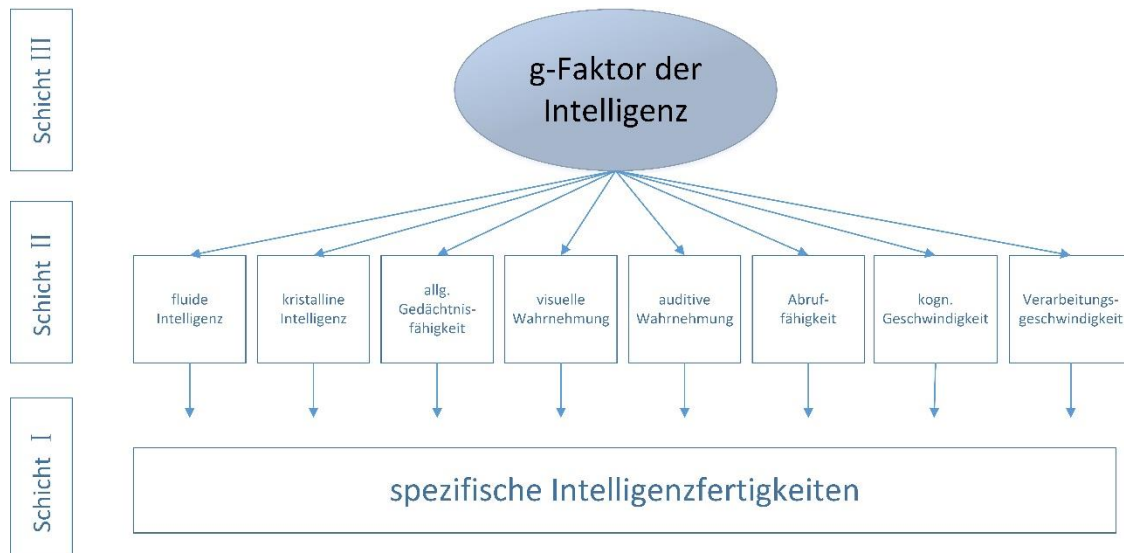


Abb. 1: Carrolls (1993) „Three stratum-Modell“ der kognitiven Fähigkeiten in übersetzter und modifizierter Form (Quelle: Holling, Preckel & Vock 2004, S. 28). Ganz oben (Schicht III) steht der sogenannte (generelle) g-Faktor der Intelligenz, eine Ebene tiefer (Schicht II) sind die acht „breite Fähigkeiten“ platziert. Ganz unten (Schicht I) finden sich dann die „engen Fähigkeiten“ (bereichs- und aufgabenspezifische Fähigkeiten).

Die mentale Rotationsfähigkeit beschreibt die Fähigkeit, zwei- oder dreidimensionale Objekte im Geiste zu drehen (vgl. Wirtz 2014), und umfasst hierbei mehrere Subprozesse (vgl. Heil & Rolke 2002): Ein entsprechender Stimulus muss dabei zunächst encodiert und dann mit einem anderen Stimulus verglichen werden. Dazwischen laufen verschiedene Kontrollprozesse ab, die notwendig sind, um unwichtige Informationen im Gedächtnis aufrechtzuerhalten. Dies entspricht der Funktion des Arbeitsgedächtnisses nach Baddeley und Hitch (1974), also der Fähigkeit, aufgabenrelevante Information in einem System bei gleichzeitiger Ausführung einer kognitiven Aufgabe aufrechtzuerhalten. Eine geringere Kapazität des Arbeitsgedächtnisses könnte damit auch ein Faktor für eine reduzierte mentale Rotationsfähigkeit sein. Die Erfassung der mentalen Rotationsfähigkeit erfolgt häufig mit dem mentalen Rotationstest (MRT), der ursprünglich von Shepard und Metzler (1971) aufgestellt und von Vandenberg und Kuse (1978) weiterentwickelt wurde. Bei den Testaufgaben von Shepard und Metzler (1971) handelt es sich um den Vergleich zweier simultan dargebotener Stimuli, wobei der rechte Stimulus eine um verschiedene Winkeldisparitäten gedrehte und/oder gespiegelte Version des linken Stimulus darstellt.

Mit dem Paper-Pencil-basierten MRT von Shepard und Metzler (1971) wurden erstmals geschlechtsspezifische empirische Unterschiede in der mentalen Rotationsfähigkeit zu Ungunsten von Frauen festgestellt (vgl. Voyer, Voyer & Bryden 1995). Geschlechtsunterschiede in der räumlichen Fähigkeit sind mittlerweile gut dokumentiert, jedoch bisher

noch unzureichend erklärt. Zur Erklärung werden verschiedene Ursachen, wie z. B. biologische (vgl. Kimura & Hampson 1994; Lynn 1994), umweltbezogene (vgl. Casey 1996) oder psychobiologische Aspekte (vgl. Halpern & LaMay 2000) herangezogen. Einige Forscher gehen davon aus, dass diese Unterschiede auf die Heterogenität beim Arbeitsgedächtnis zurückzuführen sind (vgl. Kaufmann 2007). Wie bereits oben beschrieben, erfordert die Lösung einer Rotationsaufgabe die Fähigkeit, eine aktive Repräsentation aufrechtzuerhalten, während gleichzeitig das Bild mental gedreht werden muss. Dieser Vorgang, welcher sowohl die Speicherung als auch die gleichzeitige Verarbeitung räumlicher Repräsentationen beinhaltet, passt zu den aktuellen Konzeptionen des Arbeitsgedächtnisses (vgl. Miyake & Shah 1999) und wird im Wesentlichen von den Befunden der Studie von Kaufmann (2007) bestätigt. Obwohl vor dem Hintergrund der kleinen Stichprobe ($N = 100$) die Ergebnisse von Kaufmann (2007) begrenzt belastbar sind, deuten die Studienergebnisse auf die Bedeutung des Arbeitsgedächtnisses beim Lösen von mentalen Rotationsaufgaben hin. Ausgehend davon kann vermutet werden, dass die fluide Intelligenz, die nachweislich eng mit dem Arbeitsgedächtnis verbunden ist (vgl. Fry & Hale, 1996; Kane, Hambrick & Conway 2005), ebenfalls eine erklärungsrelevante Rolle bei der Bearbeitung mentaler Rotationsaufgaben spielen könnte. Nach den uns vorliegenden Daten wurde der direkte Zusammenhang zwischen mentaler Rotationsfähigkeit und fluider Intelligenz empirisch aber bisher nicht belegt.

Bei den konstatierten Geschlechtsunterschieden in der mentalen Rotationsfähigkeit wird vielfach die Darstellungsart der Aufgabe als ein Faktor genannt, bei dem Frauen benachteiligt würden (vgl. Kozhevnikov, Cheng & Kozhevnikov 2015). Begründet wird dies damit, dass laut vorliegenden Hinweisen Frauen bei egozentrischen Darstellungen, anders als bei allozentrischen Darstellungen, genauso gut abschneiden wie Männer (vgl. Seurinck et al. 2004). Da Paper-Pencil-Aufgaben nur allozentrische Repräsentationen der Aufgaben implizieren, kann das bessere Abschneiden des männlichen Geschlechts möglicherweise (zumindest partiell) auch durch die Benachteiligung der Frauen im konventionellen MRT (Paper-Pencil-Test) erklärt werden. Mit der VR-Technologie entstehen neue Darstellungsmöglichkeiten für mentale Rotationstests, die es bisher nicht gab oder die technologisch sehr aufwendig und teuer waren. So könnten auch Shapert und Metzlers (1971) Stimuli (Würfelfiguren) mithilfe einer immersiven Technologie aus der egozentrischen Perspektive betrachtet werden. Dies eröffnet neue Möglichkeiten, das räumliche Vorstellungsvermögen und geschlechtsspezifische Unterschiede in MRT-Aufgaben grundlegend zu untersuchen.

Die VR-Technologie, welche die Nutzer digitale Inhalte realitätsnah und egozentrisch betrachten und erleben lässt, gibt den Lerngegenständen eine neue Dimension und lässt uns vermuten, dass sie sich auch positiv auf die räumliche Informationsverarbeitung auswirken könnte. Studien belegen, dass sich die Immersivität der wahrgenommenen Umwelt auf das räumliche Vorstellungsvermögen, vor allem auf die mentale Rotationsfähigkeit, positiv auswirkt (vgl. Kozhevnikov et al. 2015). Aufbauend auf den Ergebnissen von Shepards und Metzlers (1971) Studie untersuchten Kozhevnikov und Dhond (2012) die Rolle der Immersivität (d. h. immersive und nicht immersive Umgebungen) auf die MRT-Leistung. Unterschiedliche Grade der Immersivität wurden durch verschiedene experimentelle Bedingungen operationalisiert, nämlich 2-D-Desktop-Display, nicht immersives 3-D-Desktop-Display und immersive 3-D-HMD mit Tracking (vgl. Kozhevnikov & Dhond 2012). Die Autoren konnten Unterschiede zwischen immersiven und nicht immersiven Umgebungen bezüglich der visuell-räumlichen Informationsverarbeitung feststellen. Während der Nutzer dabei in einer nicht immersiven Umgebung eine allozentrische Perspektive verwendete, naht er in immersiven Umgebungen eine egozentrische Perspektive ein. Diese Ergebnisse legen nahe, dass die Leistungsdaten zur mentalen Rotationsfähigkeit, die unter Laborbedingungen und unter Verwendung eines herkömmlichen 2-D-Computerbildschirms erfasst werden, möglicherweise nicht die realitätsnahe räumliche Verarbeitung widerspiegeln (vgl. Kozhevnikov & Dhond 2012, S. 9).

Anhand des Forschungsstands ist abschließend festzustellen, dass zwischen der mentalen Rotationsfähigkeit einer Person und (1.) deren fluider Intelligenz, (2.) deren Geschlecht und (3.) dem Grad der Immersivität der zur Erfassung der MRT-Leistung eingesetzten Technologie etwaige systematische Zusammenhänge bestehen. Im folgenden Abschnitt werden hierzu entsprechende Hypothesen aufgestellt.

3 Hypothesen

Zunächst soll analysiert werden, wie sich der Immersionsgrad der Testumgebung auf die Leistung im MRT auswirkt. Die Testvarianten sind: (1.) eine nicht immersive 3-D-Darstellung auf einem konventionellen Desktop-Display (Variante NI3D), (2.) eine teilimmersive 3-D-Darstellung mit HMD (Variante TI3D) und (3.) eine vollimmersive 3-D-Darstellung mit HMD und mit der Möglichkeit zum Perspektivenwechsel (Variante VI3D). Weitere Angaben zu den getesteten Varianten (Bedingungen) sind Tab. 1 zu entnehmen. Anknüpfend an den berichteten Forschungsstand wird davon ausgegangen, dass

die Immersivität der verwendeten Technologie zur Erfassung der mentalen Rotationsfähigkeit Einfluss auf die Testleistung (gemessen nach der Anzahl richtig gelöster Aufgaben) nimmt. Es wurden folgende Hypothesen 1a und 1b aufgestellt:

H1a: In der Variante VI3D ist die Testleistung (3-D-MRT) höher als in der Variante NI3D.

H1b: In der Variante TI3D ist die Testleistung (3-D-MRT) höher, als in der Variante NI3D.

Entsprechend dem berichteten Forschungsstand ist davon auszugehen, dass die mentale Rotationsfähigkeit insgesamt zugunsten der Jungen ausgeprägt ist. Da die teilimmersive und vollimmersive Variante die Möglichkeit bietet, 3-D-Testfiguren aus der egozentrischen Perspektive zu betrachten, unterstellen wir, dass sich die geschlechtsspezifischen Unterschiede abschwächen. Entsprechend lautet die zweite Hypothese wie folgt:

H2a: Die geschlechtsspezifischen Unterschiede in der Testleistung (3-D-MRT) sind in der Variante VI3D kleiner als in der Variante NI3D.

H2b: Die geschlechtsspezifischen Unterschiede in der Testleistung (3-D-MRT) sind in der Variante TI3D kleiner als in der Variante NI3D.

Ausgehend vom bisherigen Stand der Forschung und den Ausführungen in Abschnitt 2.2 wird zudem ein Zusammenhang zwischen der fluiden Intelligenz (IQ, erfasst mit CFT 20 R) und der mentalen Rotationsfähigkeit (gemessen mit Paper-Pencil-MRT) erwartet.

H3: Es besteht eine positive Korrelation zwischen der fluiden Intelligenz und der mentalen Rotationsfähigkeit.

Unter Berücksichtigung der Annahme, dass die immersiven virtuellen Umgebungen zu einer geringeren kognitiven Belastung sowie zu einer besseren Verarbeitung visueller Reize beim Nutzer führen (vgl. Dan & Reiner 2017), gehen wir zudem davon aus, dass sich der Zusammenhang zwischen fluiden Intelligenz und mentaler Rotationsfähigkeit mit einem zunehmenden Grad der Immersivität abschwächt.

H4: Es wird erwartet, dass der Zusammenhang zwischen fluider Intelligenz und 3-D-MRT-Leistung in den Varianten VI3D und TI3D geringer ist als in der Variante NI3D.

4 Methode

In diesem Abschnitt wird die Untersuchungsmethode beschrieben. Im Einzelnen gliedert sich der Abschnitt in die Unterpunkte: Untersuchungsanlage, Stichprobe, Instrumente und Durchführung.

4.1 Untersuchungsanlage

Bei der Untersuchung handelt es sich um eine experimentelle Studie im „between subjects design“. Als between subject Faktor wurde der Grad der Immersivität variiert, welcher mithilfe von verschiedenen Technologien (Laptop, HTC VIVE und Samsung Gear) manipuliert wurde. Entsprechend ergaben sich drei Testvarianten (siehe Tab. 1). Die Versuchspersonen wurden den drei Testvarianten zufällig (randomisiert) zugewiesen. Als abhängige Variable (AV) wurde in allen drei Varianten die korrekte Lösung von 3-D-MRT-Aufgaben erhoben. Als within subjects Faktoren dienten neben personenbezogenen Angaben die fluide Intelligenz, die mentale Rotationsfähigkeit (erfasst mit Paper-Pencil) und die subjektiven Konsequenzen intuitiver Benutzung.

Tab. 1: Vergleich der Versuchsbedingungen

Variante	Versuchsbedingungen (UV)		
	NI3D	TI3D	VI3D
Immersionsgrad	nicht immersiv	teil-immersiv	voll-immersiv
Benutzerschnittstelle	Konventionell	natürlich	natürlich
Steuerung des Sichtfeldes	keine Steuerung möglich, permanente 3D Darstellung	durch die Kopfbewegung	durch die Kopfbewegung
Perspektivenwechsel	kein Wechsel möglich	kein Wechsel möglich	durch die natürliche Fortbewegung im Raum
Antwortregistrierung durch	PC-Maus (rechte und linke Maustaste)	1 Handcontroller (Trigger und Touchpad)	2 Handcontroller (rechter und linker Trigger)
Körperhaltung	sitzend	sitzend	stehend

4.2 Stichprobe

Die Stichprobe setzte sich aus $N = 234$ Gymnasialschülerinnen und Gymnasialschüler ($n = 170$) und Realschülerinnen und Realschüler ($n = 64$) zusammen. Davon waren $n = 132$ männlich und $n = 102$ weiblich. Eine Person wurde aus der Auswertung ausgeschlossen, da sie einen deutlich zu niedrigen IQ-Wert (< 70)¹ erreichte. Des Weiteren wurden Personen aus der Auswertung ausgeschlossen, bei denen die Anzahl an korrekt gelösten Aufgaben in den mentalen Rotationstests an der Grenze der Ratewahrscheinlichkeit lag ($n = 20$). Damit bestand die endgültige Stichprobe ($N = 213$) zu 56 % ($n = 120$) aus Jungen und zu 44 % ($n = 93$) aus Mädchen. Das Durchschnittsalter betrug 15.45 Jahre ($SD = 1.05$) mit einer Spanne von 13 bis 19 Jahren.

Auf die Frage, wie oft sie Computerspiele nutzen, gaben von 213 Schülerinnen und Schülern 100 (47 %) „nie“, 35 (16 %) „sehr selten“, 40 (19 %) „gelegentlich“ und 38 (18 %) „fast täglich“ an. Unter den Schülerinnen und Schülern befanden sich 34 Brillenträger (16 %). 189 Schülerinnen und Schüler waren Rechtshänder (89 %), die anderen 24 waren Linkshänder (11 %). Erfahrungen mit virtuellen Umgebungen vor der Testung hatten 96

¹ Ein IQ-Wert < 70 weist nach der ICD-10-Klassifikation auf eine leichte Intelligenzminderung hin (vgl. Dilling, Mombour & Schmidt 2014).

Personen gemacht (45 %), die restlichen 116 Personen (55 %) hatten noch keine Erfahrung mit virtuellen Umgebungen. Eine Person machte darüber keine Angabe. Die absolute Mehrheit der Schülerinnen und Schüler ($n = 206$, 97 %) fand „Virtuelles Lernen“ als Thema „sehr interessant“ ($n = 120$) oder „eher interessant“ ($n = 86$), nur sieben Schüler (3 %) fanden das Thema „uninteressant“.

4.3 Instrumente

Als Instrumente wurden in der Studie bereits validierte Paper-Pencil-Tests zur Erfassung der fluiden Intelligenz, der mentalen Rotationsfähigkeit und der subjektiven Konsequenzen intuitiver Benutzung sowie ein Test zur Messung der 3D mentalen Rotationsfähigkeit (3-D-MRT) eingesetzt. In diesem Unterabschnitt werden die Tests und Fragebögen beschrieben und anschließend über die eingesetzten Technologien berichtet.

4.3.1 Mentaler Rotationstest von Vanderberg und Kuse (1978)

Der Paper-Pencil-basierte mentale Rotationstest (MRT) wird in der von Peters et al. (1995) modifizierte Form zur Messung der mentalen Rotationsfähigkeit verwendet. Der MRT umfasst 24 Multiple-Choice-Aufgaben, die verschiedene 3-D-Figuren beinhalten, die den Figuren von Shepard und Metzler (1971) ähneln. Jede Aufgabe enthält eine Zielfigur ganz links auf der Seite und rechts vier Antwortalternativen. Die Antwortalternativen bestehen aus zwei gleichen Zeichnungen wie die Zielfigur, dargestellt aus einer anderen Perspektive, und zwei Distraktoren.

4.3.2 Culture Fair Test (CFT 20-R) von Weiß (2006)

Der CFT 20-R ist ein in der psychologischen Praxis häufig eingesetzter Test zur Erfassung der fluiden Intelligenz (vgl. Kuhn, Holling & Freund 2008). Der Test besteht aus 56 bildlichen Items zu den vier Subskalen „Reihenfortsetzen“, „Klassifikationen“, „Matrizen“ und „topologische Schlussfolgerungen“ und dauert in der Kurzform (Teil 1) 14 Minuten (4 + 4 + 3 + 3 Minuten) zuzüglich der Instruktionszeit.

4.3.3 Questionnaire for the subjective Consequences of intuitive Use (QUESI) von Naumann und Hurtienne (2010)

Der QUESI ist ein Instrument zur Messung der subjektiven Konsequenzen intuitiver Benutzung (vgl. Hurtienne 2010), wobei die intuitive Benutzung die spezielle Art und Weise, wie Nutzer eine Aufgabe mithilfe eines technischen Systems lösen, bezeichnet (vgl. Mohs et al. 2007). Von intuitiver Benutzung kann gesprochen werden, wenn Benutzer mit unterschiedlichen Vorerfahrungen und Fähigkeiten keine besonderen Anstrengungen aufbringen müssen, um ihr Ziel zu erreichen (vgl. Mohs et al. 2007). Dabei steht die geringe mentale Beanspruchung im Vordergrund. Der Hauptteil des Fragebogens besteht aus 14 Items. Die Antwortskalen sind 5-stufige Likertskalen mit den Werten von 1 = „trifft gar nicht zu“ bis hin zu 5 = „trifft völlig zu“. Alle Fragen sind so formuliert, dass höhere Zahlenwerte eine höhere Zustimmung repräsentieren. Für die vorliegende Untersuchung wurde eine verkürzte Form des Fragebogens mit zehn Items verwendet.

4.3.4 Dreidimensionaler mentaler Rotationstest (3-D-MRT)

Um die mentale Rotationsfähigkeit in den verschiedenen technologischen Testvarianten (NI3D, TI3D und VI3D) miteinander vergleichen zu können, wurde eine computerbasierte Anpassung des Tests von Shepard und Metzler (1971) vorgenommen. Der 3-D-MRT ist in jeder Testvariante gleich, nur die Art der Mensch-Maschine-Interaktion ist in den einzelnen Bedingungen unterschiedlich. Der Test beinhaltet 20 Aufgaben. Der Versuchsperson werden dabei in jeder Aufgabe zwei in verschiedene Richtungen rotierte räumliche Figuren dargeboten (siehe Abb. 2). Die Personen müssen entscheiden, ob die Figuren gleich oder ungleich sind und ihr Antwortverhalten registrieren. Die Richtigkeit zur Lösung der einzelnen Aufgabe wird protokolliert. Um die Testszenen zu erstellen und die Daten aufzuzeichnen, wurde Unity Engine verwendet. Unity Engine ist ein kostenloses, plattformübergreifendes Framework zur Entwicklung von 2-D- und 3-D-Spielen sowie anderen Anwendungen. Die 3-D-Rotationsfiguren wurden in Eigenkonstruktion mithilfe des 3-D-Modellierungstools Blender erstellt.

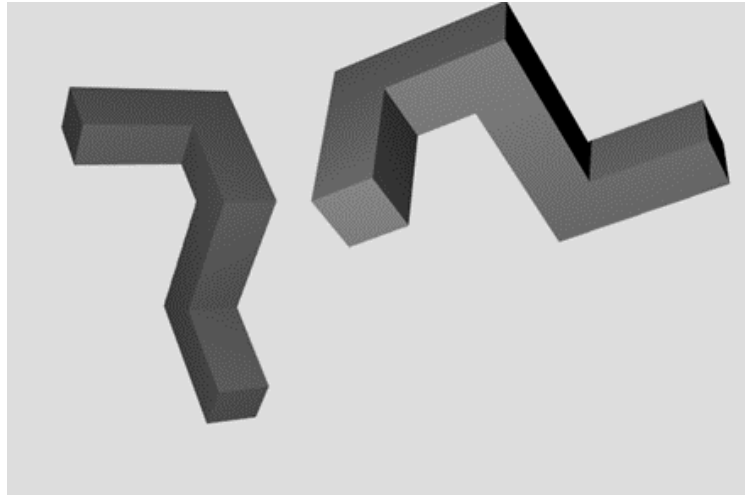


Abb. 2: Beispielaufgabe aus dem 3-D-MRT (eigene Darstellung)

4.4 Durchführung

Die Durchführung der Studie erfolgte an sechs allgemeinbildenden Schulen (4 Gymnasien und 2 Realschulen). Die insgesamt sehr zeitaufwendige Experimentalstudie wurde von maximal drei Testleitern gleichzeitig durchgeführt, die in den Bedingungen NI3D, TI3D und VI3D jeweils parallel ein bis drei Personen testeten. Zu Beginn wurden die Versuchspersonen dahingehend informiert, dass die Teilnahme an dieser Studie freiwillig sei und die Daten anonym und vertraulich behandelt werden. Die Erstellung eines persönlichen Codewortes ermöglichte den Schülerinnen und Schülern das spätere Abrufen der Ergebnisse ohne eine Zuordnung von Daten und Namen. Auch wurden die Versuchspersonen über die Dauer und den Ablauf des Experiments aufgeklärt. Ein Experiment dauerte zwischen 45 und 60 Minuten und bestand aus fünf Phasen. In der ersten Phase wurden die Testpersonen anhand eines Fragebogens zu ihren demografischen Daten befragt. In der zweiten Phase bekamen die Personen den Paper-Pencil MRT, den sie in maximal zwölf Minuten bearbeiten mussten. In der dritten Phase bearbeitete eine Testperson entweder in der Testvariante NI3D, TI3D oder VI3D den 3-D-MRT. In der vierten Phase wurden die subjektiven Konsequenzen intuitiver Benutzung der Technologie mit dem QUESI erhoben. In der letzten und fünften Phase machten die Testpersonen den IQ-Test. Zum Schluss hatten die Schülerinnen und Schüler die Möglichkeit, verschiedene spielerische Anwendungen mithilfe der virtuellen Technologien auszuprobieren. Der Ablauf mit seinen fünf Phasen und den drei einzelnen Bedingungen ist in Abb. 3 schematisch

dargestellt. Die erhobenen Daten wurden mit einschlägigen statistischen Verfahren ausgewertet. Sofern die Daten normalverteilt vorlagen, wurde bei Mittelwertvergleichen ein t-Test und bei nicht normalverteilten Daten ein Mann-Whitney-U-Test herangezogen. Um Unterschiede zwischen Gruppen in einem standardisierten Maß vergleichen zu können, wurde die Effektgröße Cohens d berechnet. Die Auswertung wurde mithilfe des Programms R (Version 3.4.4) vorgenommen, wobei für die Regressionsanalyse das Package „lme4“ verwendet wurde.

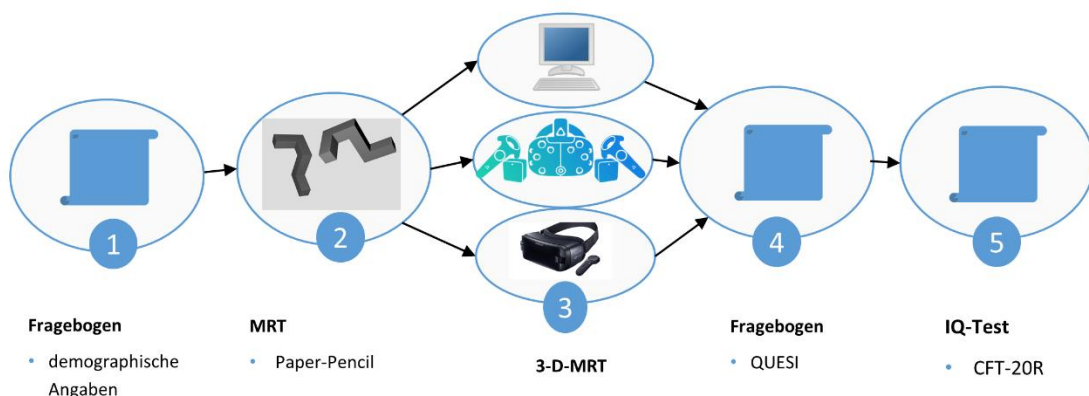


Abb. 3: Schematische Darstellung des Ablaufs der Untersuchung (eigene Darstellung).

5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die deskriptiven Ergebnisse sowie die Gütekriterien (Trennschärfe, Schwierigkeit und Reliabilität) des 3-D-MRT dargestellt. Anschließend werden die korrelativen Zusammenhänge zwischen den erhobenen Konstrukten und etwaige Subgruppenunterschiede berichtet. Anknüpfend daran werden die Befunde der Regressionsanalyse bzgl. der Hypothesenprüfung dargestellt.

5.1 Mentale Rotationsfähigkeit (Paper-Pencil)

Im Durchschnitt werden $M = 16.31$ von 24 Aufgaben richtig gelöst ($SD = 4.90$, $Min = 6$, $Max = 24$). Die Ratewahrscheinlichkeit für die richtige Lösung einer Aufgabe beträgt im MRT ein Sechstel. Diejenigen Personen, die weniger als sechs Aufgaben (25 %) richtig gelöst haben, wurden aus der Auswertung ausgeschlossen ($n = 13$). Zur Analyse eines

etwaigen Geschlechtsunterschieds in der mentalen Rotationsfähigkeit wurden die Mittelwerte der Schülerinnen und Schüler miteinander verglichen. Der *t*-Test für unabhängige Stichproben belegt erwartungskonform einen Vorteil der Schüler ($m = 17.48$, $sd = 4.60$) gegenüber den Schülerinnen ($m = 14.82$, $sd = 4.89$) bei der mentalen Rotationsfähigkeit ($t(191.69) = 4.04$, $p < .001$). Dabei handelt es sich um einen Unterschied mit mittlerer Effektstärke ($d = 0.56$).

5.2 Fluide Intelligenz

Die mittlere fluide Intelligenz (IQ) der Stichprobe beträgt $M = 108.26$ ($SD = 13.93$). Ein *t*-Test für unabhängige Stichproben stellte keinen signifikanten Unterschied zwischen den Schülern ($m = 108.00$, $sd = 14.55$) und Schülerinnen ($m = 108.60$, $sd = 13.15$) fest ($t(206.00) = 0.32$, $p = .624$).

5.3 Subjektive Konsequenzen intuitiver Benutzung

Die Reliabilität der Skala ist mit einem Cronbachs-Alpha = .86 als gut einzustufen. Der Mittelwert (5-stufige Skala) für die Gesamtstichprobe beträgt $M = 4.11$ ($SD = 0.71$) und liegt damit deutlich über dem Skalenmittelwert, was grundsätzlich für eine intuitive Benutzbarkeit der Systeme spricht. Der Gruppenvergleich zeigt Unterschiede in der intuitiven Nutzung der Technologie zwischen Schülern ($m = 4.21$, $sd = 0.67$) und Schülerinnen ($m = 3.98$, $sd = 0.75$) mit $t(185.00) = 2.37$, $p < .05$, $d = .34$ und zwischen Personen mit Spielerfahrung ($m = 4.27$, $sd = 0.56$) und Personen ohne Spielerfahrung ($m = 3.92$, $sd = 0.80$) mit $t(216.58) = 3.84$, $p < .001$, $d = 0.53$.

5.4 Mentale Rotationsfähigkeit (3-D-MRT)

Nach Itembereinigung beinhaltet der 3-D-MRT zwölf Items mit einer Reliabilität von Cronbachs-Alpha = .65. Die mittlere Lösungsquote beträgt $M = 0.81$ (81 %) mit der Standardabweichung $SD = 0.18$. Zur Kontrolle der hohen Ratewahrscheinlichkeit (50 %) wurde eine Itemratekorrektur, bei der von der Anzahl richtig gelöster Aufgaben die durch die Anzahl der Distraktoren dividierte Fehleranzahl abgezogen wird, vorgenommen (vgl. Bortz & Döring 2007, S. 217). Nach der Ratekorrektur beträgt die mittlere Lösungsquote

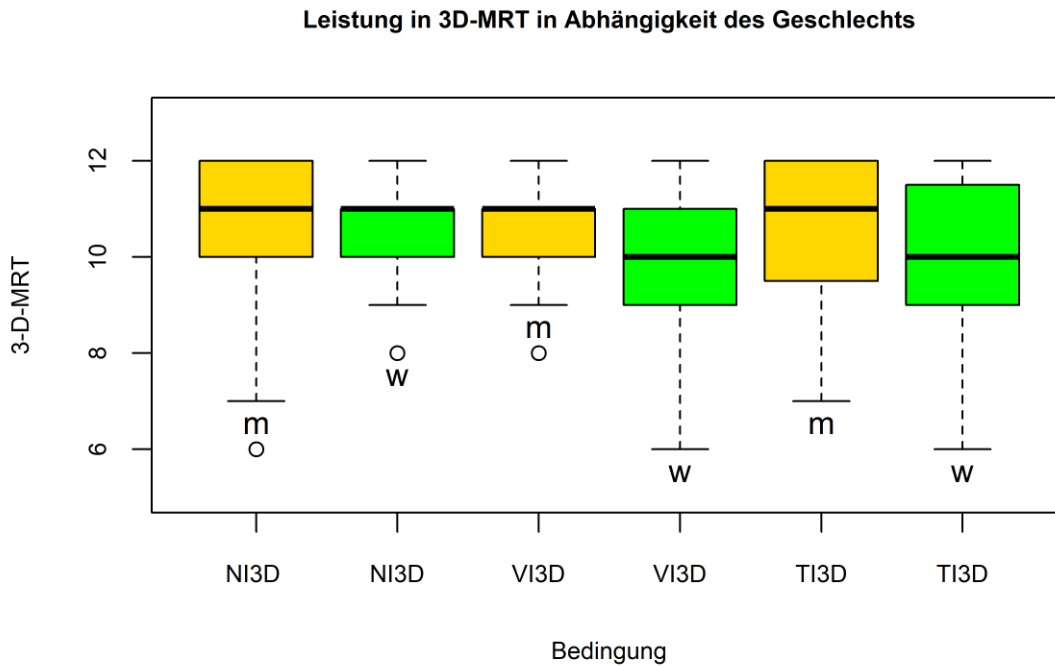
$M = 0.61$ (61 %), $Min = 0.32$, $Max = 0.76$. Die mittleren Lösungsquoten (m), Standardabweichungen (sd), Trennschärfen sowie ermittelten raw_alphas (α , wenn Item gelöscht) für die einzelnen Items sind in Tab. 2 dargestellt.

Tab. 2: Die Ergebnisse der Itemanalyse von 3-D-MRT

3-D-MRT Items	m	m (mit Ratekorrektur)	sd	Trennschärfe	α, wenn Item gelöscht
Item 03	0.80	0.60	0.40	0.28	.63
Item 04	0.82	0.64	0.38	0.26	.63
Item 05	0.66	0.32	0.48	0.30	.63
Item 06	0.88	0.76	0.32	0.32	.62
Item 08	0.74	0.48	0.44	0.28	.63
Item 11	0.79	0.58	0.41	0.24	.64
Item 12	0.88	0.76	0.33	0.24	.63
Item 13	0.81	0.62	0.40	0.29	.63
Item 16	0.79	0.58	0.41	0.27	.63
Item 17	0.87	0.74	0.34	0.38	.61
Item 18	0.81	0.62	0.40	0.25	.63
Item 19	0.84	0.68	0.37	0.40	.61

Der nicht parametrische Mann-Whitney-U-Test belegt keinen statistisch bedeutsamen Unterschied ($U(81,66) = 2136$, $p = .985$) bei der Anzahl korrekt gelöster 3-D-MRT-Aufgaben zwischen der Bedingung VI3D ($Median = 10.00$, $Min = 6$, $Max = 12$) und der Bedingung NI3D ($Median = 11.00$, $Min = 6$, $Max = 12$). Auch zwischen den erbrachten Leistungen in der Bedingung TI3D ($Median = 10.00$, $Min = 6$, $Max = 12$) und der Bedingung NI3D ($Median = 11.00$, $Min = 6$, $Max = 12$) bestehen keine signifikanten Gruppenunterschiede ($U(66,66) = 1916$, $p = .890$). Wie im nachstehenden Box-Plot (Abb. 4) dargestellt, sind die Medianwerte bei den Mädchen und Jungen in der Bedingung NI3D im Niveau vergleichbar. Beim Vergleich der beiden Bedingungen VI3D und TI3D schneiden

Abb. 4: Darstellung der Leistung im 3D-MRT in Abhängigkeit der Bedingung (NI3D = nicht-immersive 3D-Darstellung, TI3D = teil-immersive 3D-Darstellung, VI3D = voll-immersive 3D-Darstellung,) und des Geschlechts (m = männlich; w = weiblich; eigene Berechnung)



die Schüler jeweils geringfügig besser ab als die Schülerinnen. Der Mann-Whitney-U-Tests belegt aber nur in der Bedingung VI3D einen signifikanten Unterschied ($U(39,42) = 1031, p < .05, d = 0.45$) zugunsten der Schüler.

In Tab. 3 sind die Korrelationen zwischen den einzelnen erhobenen Variablen dargestellt. Auf der Ebene dieser Einzelkorrelationen zeigen sich unterstellte Zusammenhänge. Wie in Hypothese H3 postuliert, besteht eine positive Korrelation zwischen der fluiden Intelligenz (IQ) und der Paper-Pencil-MRT-Leistung ($r(213) = .49$). Außerdem wird erwartet, dass die Zusammenhänge zwischen fluiden Intelligenz (IQ) und den 3-D-MRT-Leistungen in den Bedingungen VI3D bzw. TI3D geringer sind als in der Bedingung NI3D (H4). Laut den Angaben in Tab. 3 ist dies für die beiden Varianten TI3D und VI3D der Fall. Der Korrelationskoeffizient beträgt in der Bedingung TI3D $r(66) = .24$ und ist damit kleiner als die Korrelationskoeffizienten in der Bedingung NI3D ($r(66) = .43$). Der Korrelationskoeffizient in der Bedingung VI3D beträgt den Wert $r(81) = .15$ und erweist sich als nicht signifikant. Weiterhin ist Tab. 3 zu entnehmen, dass die Korrelation zwischen dem Geschlecht und der 3-MRT-Leistung nur in der Bedingung VI3D signifikant wird ($r(81) = -.23$). Anders als in Hypothese 2 formuliert, scheinen die weiblichen Personen nur in der Bedingung VI3D schlechter als die Männer abzuschneiden (was mithilfe des nicht parametrischen Mann-Whitney-U-Test-s ebenfalls belegt wurde). Der Korrelationsmatrix ist außerdem zu entnehmen, dass der „Intuitive Use“ der Technologie mit dem Geschlecht negativ, also zugunsten der Jungen, korreliert ($r(213) = .16$). Dass die Jungen im QUESI

signifikant höhere Werte zeigen als die Mädchen, wird auch durch den Mittelwertvergleich in Abschnitt 5.3 bestätigt.

Tab. 3: Korrelationen der einbezogenen Variablen

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
(1) Paper-Pencil MRT	-	-	-	-	-	-
(2) NI3D – MRT	.44***	-	-	-	-	-
(3) TI3D – MRT	.48***	-	-	-	-	-
(4) VI3D – MRT	.35**	-	-	-	-	-
(5) Fluide Intelligenz (IQ)	.49***	.43***	.24*	.15	-	-
(6) Geschlecht	-.33***	-.08	-.17	-.23*	-.04	-
(7) QUESI	.02	-.07	.09	.16	.00	-.16*

Anmerkungen: * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

5.5 Regressionsanalyse

Da davon auszugehen ist, dass die Variablen auch untereinander interagieren, wird zu deren Prüfung eine multiple lineare Regression auf die 3-D-mentale Rotationsfähigkeit (= abhängige Variable) durchgeführt. Um das bestmögliche Regressionsmodell zu identifizieren, wurden in einem schrittweisen Prozess nach jeder Aufnahme einer neuen Variablen oder einer neuen Interaktion die R^2 -Werte und AIC-Kriterien überprüft. Das finale Modell der Regressionsanalyse ist in Tab. 4 dargestellt. Die Prädiktoren erklären insgesamt 25 % ($R^2 = .25$) der Gesamtvarianz der mentalen Rotationsfähigkeit in 3-D-Umgebung.

Tab. 4: Regressionsanalyse zur Erklärung der mentalen Rotationsfähigkeit in 3D Umgebung (= abhängige Variable; $R^2 = 0.25$).

Variablen	<i>B</i>	<i>SE(B)</i>	β	<i>t</i>	<i>p</i>
IQ-Wert	0.05	0.01	.43	3.06	.00***
Bedingung VI3D	4.55	2.36	1.46	1.93	.06
Bedingung TI3D	4.62	2.26	1.41	2.05	.04*
Geschlecht	8.03	3.29	2.64	2.44	.02*
QUESI	0.22	0.14	0.10	1.57	.12
Paper-Pencil MRT	0.11	0.02	0.35	4.64	.00***
IQ x Bedingung VI3D	-0.04	0.02	-1.53	-2.02	.04*
IQ x Bedingung TI3D	-0.04	0.02	-1.47	-2.10	.04*
IQ x Geschlecht	-0.07	0.03	-2.49	-2.27	.02*
Bedingung VI3D x Geschlecht	-6.53	4.14	-1.71	-1.58	.12
Bedingung TI3D x Geschlecht	-9.04	4.13	-2.00	-2.19	.03*
IQ x Bedingung VI3D x Geschlecht	0.05	0.03	1.52	1.39	.17
IQ x Bedingung TI3D x Geschlecht	0.08	0.04	1.91	2.04	.04*

Anmerkungen: * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$; Kodierung Geschlecht: 0 (*männlich*) bzw. 1 (*weiblich*); Kodierung Bedingung: 0 (*NI3D*), 1 (*VI3D*) und 2 (*TI3D*).

Die Regressionsanalyse unterstützt im Wesentlichen die Befunde der Korrelationsberechnungen. Als Haupteffekte auf die Lösung von 3-D-MRT-Aufgaben stellen sich heraus: der IQ, die Bedingung TI3D, das Geschlecht und die Leistung im Paper-Pencil-MRT. Folglich kann die Hypothese H1b, dass in der Variante TI3D die Testleistung im 3-D-MRT höher ist als in der Variante NI3D, durch die Regressionsanalyse bestätigt werden. Dagegen zeigt die Bedingung VI3D keinen positiven Haupteffekt, wodurch die Hypothese H1a nicht bestätigt werden kann. Des Weiteren zeigt die Regressionsanalyse keinen positiven Haupteffekt des „Intuitive Use“. Die intuitive Nutzung der Technologie scheint demnach bei der Lösung von 3-D-MRT Aufgaben keine Rolle zu spielen. Die Interaktionen zwischen dem IQ und der Bedingung sind in beiden immersiven Varianten VI3D und TI3D signifikant und bestätigen Hypothese H4, d. h., Personen mit niedrigem IQ profitieren stärker von einer immersiven Bedingung als Personen mit hohem IQ. Als eine weitere signifikante Interaktion stellt sich die zweifache Interaktion zwischen dem IQ und dem Geschlecht heraus. Abb. 5 ist zu entnehmen, dass der Einfluss des IQ auf die Leistung im 3-D-MRT bei Schülerinnen deutlich geringer ist als bei Schülern.

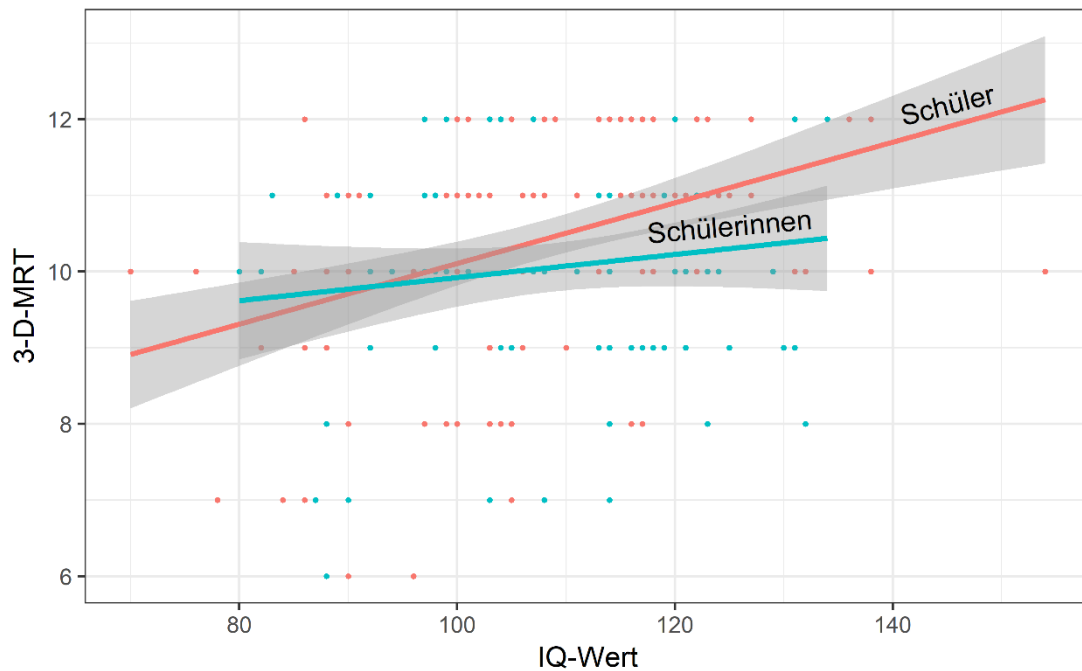


Abb. 5: Zusammenhang zwischen dem IQ und der Leistung im 3-D-MRT, getrennt für Schülerinnen und Schüler dargestellt. Die Linien veranschaulichen die Regressionsgeraden der Schülerinnen und Schüler und die grauen Bereiche stellen die jeweiligen 95% Konfidenzintervalle dar.

Die dreifache Interaktion in der Regressionsanalyse zwischen dem Geschlecht, dem IQ-Wert und der Bedingung zeigt jedoch, dass dieser Vorteil nicht für die Bedingung TI3D gilt. Die zweifache Interaktion zwischen dem Geschlecht und der Bedingung TI3D zeigt weiterhin, dass die weiblichen Personen in der Bedingung TI3D im Vergleich zu der Bedingung NI3D schlechtere Chancen haben. Die ermittelten Interaktionen der Regressionsanalyse sind in Abb. 6 in Abhängigkeit des IQ grafisch dargestellt. Die Schüler mit niedrigerem IQ schneiden in beiden immersiven Bedingungen TI3D und VI3D besser ab als in der Bedingung NI3D. Zudem weisen die Regressionslinien in beiden immersiven Bedingungen TI3D und VI3D eine geringe Steigung auf, was in Bezug auf die kognitive Leistungsfähigkeit eine gerechtere Testung andeutet. In der desktopbasierten Umgebung hingegen hat die Regressionslinie eine höhere Steigung und spricht damit für eine höhere Abhängigkeit der 3-D-MRT-Leistung vom IQ.

Bei den Schülerinnen weisen die Regressionslinien bei allen drei Varianten eine deutlich geringere Steigung auf. In der Bedingung NI3D liegt sogar ein rekursiver Verlauf vor. Das bedeutet, dass die 3-D-MRT-Leistung bei den Schülerinnen insgesamt weniger mit dem IQ zusammenhängt als bei Schülern. Zudem schneiden die Schülerinnen in den beiden immersiven Bedingungen schlechter ab als in der nicht immersiven Bedingung,

was unseren Erwartungen widerspricht. Mögliche Gründe für diesen Befund werden im nachstehenden Abschnitt diskutiert.

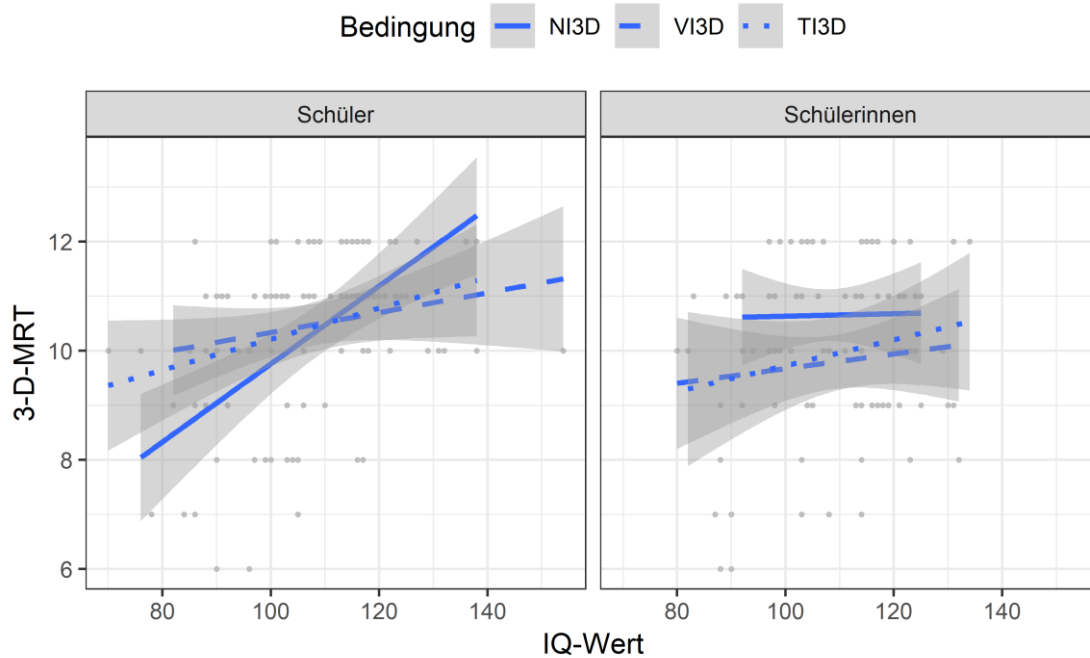


Abb. 6: Interaktion zwischen der Bedingung und dem IQ, getrennt für Schülerinnen und Schüler dargestellt. Die Linien veranschaulichen die Regressionsgeraden in den verschiedenen Bedingungen und die grauen Bereiche stellen die jeweiligen 95% Konfidenzintervalle dar.

6 Zusammenfassung und Diskussion

Nachfolgend werden die Ergebnisse zusammengefasst dargestellt und die Effekte auf die Testleistung in 3-D-MRT erörtert. Anschließend werden die Limitationen der Studie beschrieben und Anknüpfungspunkte für die weitere Forschung vorgeschlagen. Im Fokus der vorliegenden Studie steht die Erfassung der dreidimensionalen mentalen Rotationsfähigkeit in Abhängigkeit von drei Testvariationen, die mithilfe von verschiedenen virtuellen Umgebungen realisiert wurden. Neben dem Vergleich der drei Bedingungen bezüglich der 3-D-MRT Leistung von Schülerinnen und Schülern ($N = 213$) wurde der Einfluss der Variablen Geschlecht, fluide Intelligenz sowie die Paper-Pencil-MRT-Leistung erfasst und die Interaktionen zwischen diesen Variablen analysiert.

In der ersten Hypothese (H1a und H1b) ging es um die Analyse, ob sich die Bearbeitungsleistung von 3-D-MRT Aufgaben durch die Erhöhung des Immersionsgrades der Testumgebung verbessert. Dies wurde mithilfe von nicht parametrischen Mann-Whitney-

U-Tests und multiplen Regressionsanalysen überprüft. In der Regressionsanalyse wurden partielle Haupteffekte der Immersivität festgestellt. Während der Haupteffekt der Bedingung VI3D nicht signifikant ist (H1a), stellt sich der Haupteffekt der Bedingung TI3D als signifikant besser (H1b) als Bedingung NI3D heraus.

Bei der zweiten Hypothese (H2a und H2b) wurde davon ausgegangen, dass die geschlechtsspezifischen Unterschiede in den beiden immersiven Bedingungen TI3D und VI3D jeweils kleiner sind als in der Bedingung NI3D. Da aber in NI3D keine Geschlechtsunterschiede in der Leistung vorlagen, konnte die Hypothese nicht bestätigt werden.

Die dritte Hypothese (H3) geht davon aus, dass ein positiver Zusammenhang zwischen der fluiden Intelligenz und der mentalen Rotationsfähigkeit (Paper-Pencil-MRT) besteht. Auf Basis der Korrelationsanalysen ($r(213) = .49$) wird die Hypothese H3 erwartungskonform bestätigt.

Die vierte Hypothese (H4) postulierte, dass der Zusammenhang zwischen fluiden Intelligenz und 3-D-MRT-Leistung in den Varianten VI3D und TI3D geringer ist als in der Variante NI3D. Die Korrelationsanalyse bestätigt diese Hypothese: In der Bedingung TI3D beträgt der Korrelationskoeffizient $r(66) = .24$ und ist damit kleiner als in der Bedingung NI3D mit $r(66) = .43$. Der Korrelationskoeffizient in der Bedingung VI3D ist noch niedriger und zudem nicht signifikant $r(81) = .15$. Die in der Studie durchgeführte Regressionsanalyse unterstützt durch signifikante Interaktionen zwischen den Variablen IQ und Bedingung TI3D sowie zwischen IQ und Bedingung VI3D die Annahme von Hypothese H4 und belegt damit, dass Schülerinnen und Schüler mit einem niedrigen IQ einen Vorteil in den immersiven Umgebungen haben.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Bearbeitungsleistung von 3-D-MRT-Aufgaben erwartungskonform mit der fluiden Intelligenz korreliert und durch die immersive Technologie unter bestimmten Bedingungen positiv beeinflusst wird. Vor allem die Personen mit niedriger fluiden Intelligenz scheinen von den immersiven Umgebungen zu profitieren. Diese Erkenntnis steht im Einklang mit kognitiven Ansätzen, die die potenzielle Rolle des Arbeitsgedächtnisses beim Lösen von MRT-Aufgaben hervorheben (vgl. Kaufmann 2007). Durch die realitätsnahe egozentrische Wahrnehmung wird in den immersiven Bedingungen möglicherweise eine Entlastung des Arbeitsgedächtnisses verursacht, wodurch Personen mit niedriger fluiden Intelligenz besonders profitieren. Folgt man dem Ansatz der Cognitive-Load-Theorie (vgl. Sweller 2006), entspricht diese Art

der Entlastung dem „Extraneous cognitive Load“, welcher durch die Darstellung und Gestaltung des Lernmaterials beeinflusst wird. Da in dieser Studie der „Cognitive Load“ beim Lösen von 3-D-MRT Aufgaben nicht erhoben wurde, verbindet sich mit der erklärenden Rolle des Arbeitsgedächtnisses für die erzielten Ergebnisse ein Forschungsausblick. In weiterführenden Studien sollte neben der fluiden Intelligenz auch die Arbeitsgedächtniskapazität gemessen und kontrolliert werden, was für die vorliegende Studie eine Hauptlimitation darstellt.

Eine weitere Limitation der Studie war die Ratewahrscheinlichkeit bei den 3-D-MRT-Aufgaben. Da die Personen zwischen zwei Antwortalternativen entscheiden mussten, betrug die Ratewahrscheinlichkeit satte 50 %, wodurch die Reliabilität der Skala zwar noch akzeptabel, aber auch verbesserungsbedürftig ausfiel (Cronbachs Alpha = .65). Die Verminderung der Ratewahrscheinlichkeit sollte für zukünftige Studien möglichst in Betracht gezogen werden. Des Weiteren wäre es interessant, die Reaktionszeiten für die Lösung der einzelnen Aufgaben in die Analysen einzubeziehen, um ebenfalls etwaige Rückschlüsse auf das Rateverhalten zu ziehen. Hierzu ist ein Beitrag von Ariali und Zinn in Vorbereitung. Die Zeiten, die für die Lösung der Aufgaben individuell benötigt werden, können als eigenständige Maßeinheiten für die Leistung in 3-D-MRT betrachtet und als abhängige Variable erfasst werden. Verschiedene Forschergruppen haben etwaige Testzeiten in mentalen Rotationstests bereits erfolgreich für die Messung der mentalen Rotationsfähigkeit eingesetzt (vgl. Shepard & Metzler 1988; Jordan et al. 2002).

Eine weitere Erkenntnis der Studie ist, dass geschlechtsspezifische Unterschiede in der gemessenen mentalen Rotationsfähigkeit durch die dreidimensionale Darstellung der Rotationsfiguren in den Bedingungen NI3D und TI3D verschwinden. Die Annahme, dass sich die egozentrische Darstellung (wie sie in Bedingung TI3D und VI3D gegeben war) beim Lösen von räumlichen Aufgaben förderlich auf die Leistung auswirkt, konnte hingegen nicht uneingeschränkt bestätigt werden. Die Ergebnisse lassen uns vermuten, dass einerseits die Personenmerkmale und andererseits die Art der Aufgabe dabei entscheidend sein könnten.

Eine weitere Limitation der Studie stellt die heterogene Erfahrung der Schülerinnen und Schüler mit der VR-Technologie dar. Über die Hälfte (55 %) der Versuchspersonen hatte zum Zeitpunkt der Testung keinerlei Erfahrungen mit virtuellen Umgebungen, was sich möglicherweise auch auf die Arbeitsweise mit der Technologie ausgewirkt haben könnte. Für diejenigen Personen, die insgesamt weniger vertraut mit der VR-Technik sind, könnte

dies ein Hindernis bei der Lösung von 3-D-MRT-Aufgaben (vor allem in der Bedingung VI3D) sein. Die weiterführende Analyse, inwieweit der kontrollierte Umgang mit virtuellen Umgebungen sich auf das räumliche Vorstellungsvermögen und auf das Bearbeiten dreidimensionaler Aufgaben auswirkt, stellt ein weitergehendes Desiderat zukünftiger Forschung dar.

7 Literatur

- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working Memory. In G. H. Bower (Hrsg.), *Psychology of Learning and Motivation* (Bd. 8, S. 47–89). New York: Academic Press.
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded Cognition. *Annual Review of Psychology*, 59(1), 617–645.
- Bleser, C. (2017). *Virtual Reality als gemeinsames Erlebnis. Entwicklung einer interaktiven Anwendung zur Echtzeitsynchronisation mobiler Endgeräte*. Hamburg: Diplomica Verlag.
- Bortz, J., & Döring, N. (2007). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler: Limitierte Sonderausgabe*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Carroll, J. B. (1993). *Human Cognitive Abilities: A Survey of Factor-Analytic Studies*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Casey, M. B. (1996). Gender, sex, and cognition: Considering the interrelationship between biological and environmental factors. *Learning and Individual Differences*, 8(1), 39–53.
- Castro-Alonso, J. C. & Uttal, D. H. (2018). Spatial Ability for University Biology Education. In *Advances in Human Factors in Training, Education, and Learning Sciences* (283–291). Cham: Springer.
- Cattell, R. B. (1987). *Intelligence: Its Structure, Growth and Action*. New York: Elsevier.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates.
- Dan, A. & Reiner, M. (2017). EEG-based cognitive load of processing events in 3D virtual worlds is lower than processing events in 2D displays. *International Journal of Psychophysiology*, 122, 75–84.
- Dede, C. (2009). Immersive Interfaces for Engagement and Learning. *Science*, 323(5910), 66–69.
- Dilling, H., Mombour, W. & Schmidt, M. H. (2000). *Internationale Klassifikation psychischer Störungen ICD-10*. Bern: Hans Huber.
- Dörner, R., Broll, W., Grimm, P. & Jung, B. (2014). *Virtual und Augmented Reality (VR / AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Berlin: Springer
- Fry, A. F. & Hale, S. (1996). Processing Speed, Working Memory, and Fluid Intelligence: Evidence for a Developmental Cascade, *Psychological Science*, 7(4), 237–241.
- Gruber, H. & Stamouli, E. (2009). Intelligenz und Vorwissen. In *Pädagogische Psychologie* (27–47). Heidelberg: Springer.
- Hagen, I. (2017). Perception Virtuality. In: M. Eibl & M. Gaedke (Hrsg.), *INFORMATIK 2017* (S. 2525-2536). Bonn: Gesellschaft für Informatik.

- Halpern, D. F. & LaMay, M. L. (2000). The Smarter Sex: A Critical Review of Sex Differences in Intelligence. *Educational Psychology Review*, 12(2), 229–246.
- Harris, R. Z., Benet, L. Z. & Schwartz, J. B. (1995). Gender effects in pharmacokinetics and pharmacodynamics. *Drugs*, 50(2), 222–239.
- Heil, M. & Rolke, B. (2002). Toward a chronopsychophysiology of mental rotation. *Psychophysiology*, 39(4), 414–422.
- Holling, H., Preckel, F., & Vock, M. (2004). *Intelligenzdiagnostik*. Göttingen: Hogrefe Verlag.
- Horn, J. L. & Cattell, R. B. (1966). Refinement and test of the theory of fluid and crystallized general intelligences. *Journal of Educational Psychology*, 57(5), 253–270.
- Inhelder, B. & Piaget, J. (1958). *The growth of logical thinking from childhood to adolescence*. New York: Basic.
- Jensen, A. R. (1998). *The g factor: the science of mental ability*. Westport, Conn: Praeger.
- Johnson, W. & Bouchardjr, T. (2005). The structure of human intelligence: It is verbal, perceptual, and image rotation (VPR), not fluid and crystallized. *Intelligence*, 33(4), 393–416.
- Jordan, K., Wüstenberg, T., Heinze, H.-J., Peters, M. & Jäncke, L. (2002). Women and men exhibit different cortical activation patterns during mental rotation tasks. *Neuropsychologia*, 40(13), 2397–2408.
- Kane, M. J., Hambrick, D. Z. & Conway, A. R. A. (2005). Working Memory Capacity and Fluid Intelligence Are Strongly Related Constructs: Comment on Ackerman, Beier, and Boyle (2005). *Psychological Bulletin*, 131(1), 66–71.
- Kaufman, S. B. (2007). Sex differences in mental rotation and spatial visualization ability: Can they be accounted for by differences in working memory capacity? *Intelligence*, 35(3), 211–223.
- Kimura, D. & Hampson, E. (1994). Cognitive Pattern in Men and Women Is Influenced by Fluctuations in Sex Hormones. *Current Directions in Psychological Science*, 3(2), 57–61.
- Köhler, T., Münster, S. & Schlenker, L. (2013). Didaktik virtueller Realität. Ansätze für eine zielgruppengerechte Gestaltung im Kontext akademischer Bildung. In G. Reinmann, P. Baumgartner & R. Schulmeister (Hrsg.), *Hochschuldidaktik im Zeichen von Heterogenität und Vielfalt. Doppelfestschrift für Peter Baumgärtner und Rolf Schulmeister* (S. 99–112). Norderstedt: Books on Demand.
- Korgel, D. (2017). *Virtual Reality-Spiele entwickeln mit Unity?* München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Kozhevnikov, M., & Dhond, R. P. (2012). Understanding Immersivity: Image Generation and Transformation Processes in 3D Immersive Environments. *Frontiers in Psychology*, 3, 1–10. Online: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00284>
- Kozhevnikov, M., Cheng, L. R. & Kozhevnikov, M. (2015). Effect of Environment Immersivity on Encoding Strategies of Spatial Tasks. *Procedia Manufacturing*, 3, 5059–5066. Online: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.519>
- Kuhn, J.-T., Holling, H. & Freund, P. A. (2008). Begabungsdagnostik mit dem Grundintelligenztest (CFT 20-R). *Diagnostica*, 54(4), 184–192.
- Lynn, R. (1994). Sex differences in intelligence and brain size: A paradox resolved. *Personality and Individual Differences*, 17(2), 257–271.
- Linn, M., & Petersen, A. (1985). Emergence and Characterization of Sex Differences in Spatial Ability: A Meta-Analysis. *Child Development*, 56(6), 1479-1498.

- McIntire, J. P., Havig, P. R. & Geiselman, E. E. (2014). Stereoscopic 3D displays and human performance: A comprehensive review. *Displays*, 35(1), 18–26.
- Miyake, A., & Shah, P. (1999). *Models of Working Memory: Mechanisms of Active Maintenance and Executive Control*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Mohs, C., Israel, J. H., Kindsmüller, M. C., Hußlein, S. & Naumann, A. B. (2007). Intuitive Benutzung als Ziel in der Produktentwicklung. In: H. Brau & K. Röse (Hrsg.), *Tagungsband UP0* (S. 205–208). Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Murcia-López, M. & Steed, A. (2016). The Effect of Environmental Features, Self-Avatar, and Immersion on Object Location Memory in Virtual Environments. *Frontiers in ICT*, 3. Online: <https://doi.org/10.3389/fict.2016.00024>
- Naumann, A. & Hurtienne, J. (2010). Benchmarks for Intuitive Interaction with Mobile Devices. In *Proceedings of the 12th International Conference on Human Computer Interaction with Mobile Devices and Services* (401–402). New York, NY, USA: ACM.
- Nico, D. & Daprati, E. (2009). The egocentric reference for visual exploration and orientation. *Brain and Cognition*, 69(2), 227–235.
- Pausch, R., Proffitt, D. & Williams, G. (1997). Quantifying Immersion in Virtual Reality. In *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques* (13–18). New York: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- Peters, M., Laeng, B., Latham, K., Jackson, M., Zaiyouna, R. & Richardson, C. (1995). A Redrawn Vandenberg and Kuse Mental Rotations Test - Different Versions and Factors That Affect Performance. *Brain and Cognition*, 28(1), 39–58.
- Quaiser-Pohl, C. & Endepohls-Ulpe, M. (2010). *Bildungsprozesse im MINT-Bereich. Interesse, Partizipation und Leistungen von Mädchen und Jungen*. Münster: Waxmann Verlag.
- Rheingold, H. (1992). *Virtuelle Welten: Reisen im Cyberspace*. Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag.
- Seurinck, R., Vingerhoets, G., de Lange, F. P. & Achten, E. (2004). Does egocentric mental rotation elicit sex differences? *NeuroImage*, 23(4), 1440–1449.
- Schuster, K. (2015). *Einfluss natürlicher Benutzerschnittstellen zur Steuerung des Sichtfeldes und der Fortbewegung auf Rezeptionsprozesse in virtuellen Lernumgebungen*. Marburg: Tectum Wissenschaftsverlag.
- Shepard, R. N. & Metzler, J. (1971). Mental Rotation of Three-Dimensional Objects. *Science*, 171(3972), 701–703.
- Shepard, S. & Metzler, D. (1988). Mental rotation: effects of dimensionality of objects and type of task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14(1), 3–11.
- Sorby, S. A. (2009). Educational Research in Developing 3-D Spatial Skills for Engineering Students. *International Journal of Science Education*, 31(3), 459–480.
- Sweller, J. (2006). How the Human Cognitive System Deals with Complexity. In J. Elen & R. E. Clark (Hrsg.), *Handling Complexity in Learning Environments: Theory and Research* (13–25). Amsterdam: Elsevier.
- Thomas, O., Metzger, D. & Niegemann, H. M. (2018). *Digitalisierung in der Aus- und Weiterbildung: Virtual und Augmented Reality für Industrie 4.0*. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler Berlin Heidelberg.
- Thurstone, L. L. (1938). *Primary mental abilities*. Chicago: University of Chicago Press.
- Thurstone, L. L. & Thurstone, T. G. (1941). *Factorial studies of intelligence*. Chicago: University of Chicago Press.
- Vandenberg, S. G. & Kuse, A. R. (1978). Mental Rotations, a Group Test of Three-Dimensional Spatial Visualization. *Perceptual and Motor Skills*, 47(2), 599–604.

- Vassigh, S., Ortega, F. R., Barreto, A., Tarre, K. & Maldonado, J. (2018). Use of 3D Human-Computer Interaction for Teaching in the Architectural, Engineering and Construction Fields. In M. Antona & C. Stephanidis (Hrsg.) *Universal Access in Human-Computer Interaction. Virtual, Augmented, and Intelligent Environments* (149–159). Cham: Springer
- Vernon, P. E. (1971). Effects of Administration and Scoring on Divergent Thinking Tests. *British Journal of Educational Psychology*, 41(3), 245–257.
- Voyer, D., Voyer, S. & Bryden, M. P. (1995). Magnitude of sex differences in spatial abilities: a meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychological Bulletin*, 117(2), 250–270.
- Weiß, R. H. (2006). *Grundintelligenztest Skala 2 –Revision (CFT 20 -R)*. Göttingen: Hogrefe.
- Wirtz, M. A. (2014). *Dorsch – Lexikon der Psychologie* (17. Aufl.). Bern: Hogrefe AG.
- Zacks, J. M. & Michelon, P. (2005). Transformations of Visuospatial Images. *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews*, 4(2), 96–118.
- Zinn, B. (2017). Digitalisierung der Arbeit – Kompetenzerwartungen des Beschäftigungssystems und didaktische Implikationen. In B. Bonz, H. Schanz & J. Seifried (Hrsg.), *Berufsbildung vor neuen Herausforderungen – Wandel von Arbeit und Wirtschaft, Berufsbildung konkret* (163–176), Band 13, Baltmannsweiler: Schneider Verlag Hohengeheren GmbH.
- Zinn, B., Guo, Q. & Sari, D. (2016). Entwicklung und Evaluation einer virtuellen Lehr- und Lernumgebung für Servicetechniker im industriellen Dienstleistungsbereich. *Journal of Technical Education (JOTED)*, 4(1), 98–125.

2.2 Publikation 2

Training of mental rotation ability in virtual spaces

ABSTRACT: Mental rotation ability is seen as an important condition for the development of professional competence in many technical professions. Previous studies have shown that mental rotation can be trained by repeatedly performing mental or manual rotations. Virtual technology opens up the possibility of capturing and training mental rotation ability in near-reality environments. So far, there is little empirical evidence on the potential and effectiveness of virtual environments to analyse and enhance this ability. This study is intended to generate findings on the VR-based, adaptive training of mental rotation ability for the development of a support measure. A pre-post examination of mental rotation ability was chosen as the design of the study. Two virtual phases took place between the pre- and post-inquiry, in which the test persons (mainly students, N = 100) dealt with virtual 3D items. It was shown that the mental rotation ability of the test subjects improved after working with virtual items. Furthermore, the results provide information on the suitability of the virtual 3D items for measuring and the adaptive training of mental rotation. The flaws of the study and the prospects for designing an adaptive, VR-based form of mental rotation training are discussed.

Training der mentalen Rotationsfähigkeit in virtuellen Räumen

ZUSAMMENFASSUNG: Die mentale Rotationsfähigkeit wird als eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung der Fachkompetenz in vielen technischen Berufen angesehen. Bisherigen Studien zufolge kann die mentale Rotationsfähigkeit durch wiederholte Ausführung mentaler oder manueller Rotationen trainiert werden. Virtuelle Technologie eröffnet die Möglichkeit, die mentale Rotationsfähigkeit in realitätsnahen Umgebungen zu erfassen und zu trainieren. Bislang liegen wenige aussagekräftige empirische Erkenntnisse zu den Einsatzmöglichkeiten und der Effektivität von virtuellen Umgebungen zur Analyse und Förderung dieser Fähigkeit vor. Mit dieser Studie sollen anschlussfähige Befunde über die VR-basierten, adaptiven Trainings der mentalen Rotationsfähigkeit zur Entwicklung einer Fördermaßnahme generiert werden. Als Design der Studie wurde eine Prä-Post-Untersuchung der mentalen Rotationsfähigkeit gewählt. Zwischen der Vor- und Nacherhebung fanden zwei virtuelle Phasen statt, in welchen die Probanden (überwiegend Studierende, N = 100) virtuelle 3D Items bearbeiteten. Es zeigte sich, dass sich die mentale Rotationsfähigkeit der Testpersonen nach der Arbeit mit virtuellen Items verbesserte. Darüber hinaus geben die Ergebnisse Aufschluss über die Eig-

nung der virtuellen 3D Items zur Erfassung und zum adaptiven Training mentaler Rotationsfähigkeit. Die Schwächen der Studie sowie die Aussichten zur Gestaltung eines adaptiven, VR-basierten mentalen Rotationstrainings werden diskutiert.

1 Introduction

Virtual reality (VR) is a computer-generated three-dimensional (3D) representation of real or fictitious environments in which the user can enter and perform near-realistic actions. According to embodied cognition theory, physical conditions and actions have a basal influence on human cognition (Wilson 2002). Following this approach, complex interactions with the environment, whether real or virtual, play a decisive role in learning. The so-called fully immersive (FI) virtual environments are characterised by the fact that they allow the use of natural user interfaces (e.g. head-mounted display, Leap Motion, data gloves, etc.), thus enabling the user to interact with virtual objects, perform actions, and move in virtual space in a natural way (Ariali & Zinn 2020; Mohler 2000). A special feature of immersive virtual environments is the possibility to perceive the environment egocentrically. The egocentric perception of objects and relationships is responsible for success in different domains and shows different relationships than in real-world performance (Kozhevnikov et al. 2013). In view of these advantages, VR provides the opportunity to implement training sessions that require a realistic interaction with the environment and would be too complicated or too expensive under real conditions. Especially for those areas that require spatial imagination, VR can be effectively used to train certain abilities and to study different aspects of spatial behaviour and spatial skills (Dünser et al. 2006). Mental rotation ability (MRA) is one such area that has often been studied in the context of virtual environments (Ganis & Kievit 2015; Kozhevnikov & Dhond 2012). This ability, as an important part of spatial imagination and therefore of human intelligence, is a necessary condition in many scientific and technical professions. Due to its importance, the possibilities of promoting mental rotation ability received a lot of attention for a long time. Meanwhile there is enough empirical evidence that MRA can be trained. Although the trainability of mental rotational ability is generally well proven, there are hardly any empirically validated instruments for the targeted support of this ability in adulthood. Attempts to train MRA by using VR-based technology have also often failed. The reasons for this could be the limited possibilities of using non-immersive technologies in particular. Unlike non-immersive or partially immersive (PI) technology,

FI technology allows to immerse oneself almost completely in a virtual world. For example, the combination of the VR system HTC VIVE with Leap Motion technology offers users, in addition to 3D representation, the possibility of interacting with virtual figures in a realistic way. HTC VIVE uses an optical tracking system in which two base stations are placed at opposite sides of the room (Hagen 2017). With the help of integrated infrared LEDs and two lasers, one each for the vertical and horizontal axes, the base stations cover an area of 5 x 5 metres in which the user can move. For interaction with the virtual objects, Leap Motion technology can be integrated into the application in addition to the conventional controllers. This recognises the user's hands and allows gesture-based control.

In addition to the realistic design possibilities of the training, virtual environments allow the integration of motivational elements and processes. These can be realised, for example, in the form of animations, gamification or the user-oriented, adaptive design of learning materials. In e-learning research, adaptive learning environments are given significant meaning, as they can personalise the learning content and the learning process (Rey 2009). These are designed in such a way that they adapt learning materials according to the learner's needs or skill level, as indicated by their responses to tasks. By specifying learning-relevant materials, acceptance and learning efficiency can be increased in addition to learning motivation (Thalman 2014).

The possibility of training mental rotation skills in a FI virtual environment with adaptively designed learning materials opens up new perspectives for the development and investigation of new support concepts. This study is intended to generate findings for the VR-based evaluation and future adaptive support of the MRA to develop a training program. For this purpose, virtual 3D figures are constructed in which the number of cuboids is varied as difficulty-determining features assumed a priori. The test persons had the possibility to interact with the virtual figures in two different phases in a realistic way. The first phase served as a test phase and the second phase as a training phase of MRA. Before and after the virtual phases, the paper-and-pencil based MRA of the persons was determined. If dealing with the virtual tasks had a positive training effect, MRA (measured by a paper-and-pencil test according to Peters et al. (1995)) should have improved after the virtual phases. For the future adaptive design of a training session, it would also be important to know whether the difficulty-determining features assumed a priori actually influence the task difficulty for the persons. The task difficulty can be determined by

the Item Response Theory (IRT; Rasch 1960) scaling of solution data. Based on these considerations, the following questions were to be answered by the analysis:

- How does the virtual phases affect the mental rotation ability?
- How do difficulty-determining feature assumed *a priori* (the number of cuboids of an item) correlate with IRT-based difficulty determination of the tasks?

Furthermore, to design innovative and efficient training environments, paper-and-pencil tests need to be replaced by the digital alternatives. This would require the development and validation of such tests. In the context of this study, this issue was considered, and after IRT scaling of the virtual mental rotation test (MRT) items from the first virtual phase and thereby determination of the personal abilities, the following question was formulated:

- How is the MRA measured by paper-and-pencil MRT related to the MRA measured by virtual MRT?

In this regard, the second section of this article deals with the theoretical and empirical foundations and the training of MRA. The third section defines the research questions. In the fourth section, the methodological approach of the study is explained, followed by a report on the results in the fifth section. In the sixth section, the central findings are discussed before finally summarising the study.

2 Theoretical and empirical background

2.1 VR-Technology

The dynamic dissemination of new technologies is associated with fundamental processes of change and reveals a great potential to optimise educational opportunities. With the integration of digital technologies, innovative learning and working environments can be created to make teaching and learning processes more flexible, individualised, analysed, and optimised. One of these possibilities is virtual reality (VR), which allows learning in realistic simulations and thus offers numerous advantages: VR makes it possible to simulate fictitious environments that would be impossible or too dangerous in real conditions

(Schuster 2015). Furthermore, it is possible to modify parameters that often cannot be changed in a real system, e.g. change of gravity (Potkonjak et al. 2016). The modifications and changes can be reversed just as easily. The use of VR allows researchers to create the exact same conditions for all participants or to vary certain environmental variables in real time, giving researchers more control over experimental settings (Dünser et al. 2006). An additional advantage of using computer-generated environments is the possibility to automatically log data relevant to the study, providing an efficient alternative to other data collection methods (Dünser et al. 2006). The data can not only be collected in real time, but also automatically analysed and reported back to the persons directly. The system can also take the collected data into account and incorporate it into the adaptation of the learning environment of the learner.

Due to numerous advantages, virtual realities have long been researched (Cipresso et al. 2018). There are also numerous differentiations of virtual environments (Fuchs 2017). According to the most common understanding, VRs are computer-generated real-time representations of real or fictitious environments, which enable a special kind of human-machine interaction by enriching them with artificial or increasingly natural user interfaces. The specialty of VR is the experience of being in a foreign place (Rheingold 1992). The situation in which the virtual environment is perceived as real is called immersion, and corresponding virtual environments are described as immersive. Typically, immersive environments are divided into fully immersive (FI) and partially immersive (PI) virtual environments (Ariali & Zinn 2020). Due to technological limitations, the feeling of immersion can only be conveyed to a limited extent in today's VR environments. Nevertheless, the technology which can give the highest feeling of immersion is often called FI (Ariali & Zinn 2020). FI environments are characterised by the use of natural user interfaces (including head-mounted display, gesture control). This allows the user to interact with virtual 3D objects in a natural way, perform actions, and move around in virtual space. Since the user's position in space is constantly recorded, it is possible to move around in the virtual environment in an egocentric perspective and to explore it visually and aurally (Korgel 2017). The disadvantages of the FI environment are the higher technological effort and the limited mobility of the necessary equipment. On the other hand, PI solutions are characterised especially by the high mobility of their equipment. Similar to FI environments, PI environments allow an egocentric representation of space and objects; natural user interfaces are also available, but the possibilities for interaction are limited. For example, the user cannot walk around virtual objects naturally and view them

from different perspectives. A technological example for the realisation of a PI environment is the pair of VR -glasses Samsung Gear, which allow a stereoscopic, egocentric VR representation but only provide limited movement and interaction possibilities.

PI technology is often used to implement virtual learning environments due to the generally favourable availability and good mobility of the equipment. However, it can be assumed that, in addition to the egocentric representation of the environment, the possibility of changing perspectives through natural walking can be beneficial for learning, which is currently only supported by FI environments. The study by Ariali and Zinn (2020) showed that 3D mental rotation tasks can be solved more quickly in FI virtual environments than in PI environments. Therefore, a FI virtual environment is recommended for the realisation of pedagogically valuable learning and training environments which involve spatial relationships (Ariali & Zinn 2020).

The current state of research also proves the advantage of immersive technologies over a computer desktop in some areas. These are mainly applications which involve spatial arrangements and contexts. In contrast to desktop-based representation (a non-immersive environment), the user has a view from an egocentric perspective in immersive virtual environments, which corresponds to a realistic perception of the environment and its objects (Dede 2009). Additionally, the possibility of movement allows the perception of space and objects from different angles and can thus help to facilitate the processing of spatial information. Already 20 years ago, Pausch, Proffitt and Williams (1997) concluded that training with desktop PCs was of limited efficiency for the development of reality-related skills and subsequently used precursors of immersive technology in visual-spatial search tasks. The results of Pausch, Proffitt and Williams (1997) indicated that the new VR technology can be used to solve such tasks more efficiently. Murcia-López and Steed (2016) also showed that complex spatial knowledge tasks are solved in virtual environments at a higher rate than in desktop-based environments. Dan and Reiner (2017) explained this by the fact that the use of immersive virtual environments leads to a lower cognitive load and more efficient processing of visual stimuli for users compared to two-dimensional content. Furthermore, other studies have indicated that people with a lack of spatial imagination especially benefited from immersive virtual environments (Dan & Reiner 2017; Ariali & Zinn 2018). The overloading of the brain by a series of cognitive operations can be used to explain this connection. Such cognitive operations are mental rotation and visual spatial transformation, which are necessary in screen-based activities

to carry out a change of perspective (Zacks & Michelon 2005). Virtual perception is strictly egocentric and seems to be based on an implicit, automatic coding mechanism (Nico & Daprati 2009) which may facilitate information processing. The possibility of a VR-supported egocentric perception of 3D objects can thus be helpful in constructing adequate 3D mental images of the learning content.

2.2 Mental rotation ability

The mental rotation ability describes the ability to rotate 2D or 3D figures and objects mentally, i.e. in thought (Linn & Petersen 1985). It can be classified under the spatial imagination, which again is an important facet of human intelligence (Hegarty & Waller 2005). The construct of spatial ability can be further divided into several subfactors. Linn and Peterson (1985) distinguished three categories of spatial abilities based on different processes relevant for solving different types of tasks. The three categories are (1) spatial perception, i.e. the perception of spatial relations between objects and in relation to the localisation of one's own body, (2) spatial visualisation as processing and manipulation of spatial information in several steps, and (3) mental rotation.

Mental rotation describes mental simulation of an object's rotation in space (Hegarty & Waller 2005) and requires cognitive processes to imagine how objects will appear when they are rotated (Jäncke & Jordan 2007; Heil & Rolke 2002). According to some views, these cognitive processes are associated with physical rotation and cause the activation of motor representations associated with the actual physical rotation of objects (Adams et al. 2014; Steiff et al. 2018). To support this view, Wohlschläger and Wohlschläger (1998) proposed the hypothesis of the "common process", which states that there is a common process that controls both the motor commands for manual object rotation and the change in cognitive processes for mental rotation. Wohlschläger and Wohlschläger (1998) proved their theory in a series of experiments in which mental and simulated manual rotation were compared for the same stimuli. In rotations around Cartesian axes, they found that the reaction times of manual and mental rotation were functionally connected. The assumption of Wohlschläger and Wohlschläger (1998) is also supported by the results of Shepard & Metzler (1971) who demonstrated a linear relationship between the angle of rotation of the figure and the speed of mental rotation. Hence, angular disparity has been considered an important difficulty-determining characteristic of rotational figures. According to Steiff et al. (2018), the complexity of the stimulus can also have an

impact on mental rotation. The authors used the tasks from the subject of chemistry, which requires mental rotation to compare the molecules. They observed that the performance of the participants decreased as the spatial complexity of the molecules increased. For stimuli which contained molecular representations with two asymmetric axes, participant accuracy was reduced, and response time increased compared to stimuli with a single asymmetric axis (Steiff et al. 2018). Since the stimulus complexity can be expressed in further facets besides the number of axes, more detailed research is needed to show which factors interfere with mental rotation and to derive support requirements.

Mental rotation has so far been studied in various contexts and is considered an indispensable skill in many academic fields (including mechanical engineering, architecture, anatomy, medicine, biology, geology, etc.) as well as in several commercial and technical professions (Eliot 2017; Castro-Alonso & Uttal 2019). Especially in the digitalised and competitive working environment of the 21st century, it is becoming increasingly important to be able to understand, use, and think about different forms of information (Lane, Lynch & MCGarr 2019). MRA is indispensable to be successful in technical professions (Halpern 2000). The importance of this ability for scientific and technical disciplines has also been empirically proven several times. Sorby and Baartmans (2000), Sorby et al. (2013), and Veurink and Sorby (2019) showed that an improvement in spatial skills, and especially mental rotation ability, can lead to better performance in the areas of maths, computer science, natural science, and technology (MINT). There are significantly high positive correlations between mathematical skills and spatial abilities (Mix et al. 2016; Sella et al. 2016). Goktepe and Ozdemir (2020), for example, were able to show in their quasi-experimental study that engineering and design-oriented mathematical activities have a positive effect on the development of students' spatial abilities. This confirmed the results of previous studies in which similar approaches were used (Sorby & Baartmans 1996; Hegarty & Waller 2005).

MRA is often measured with the mental rotation test (MRT), which was originally established by Shepard and Metzler (1971) and further developed by Vandenberg and Kuse (1978). The test tasks of Shepard and Metzler (1971) involved the comparison of two simultaneously presented stimuli, whereby the right stimulus represented a version of the left stimulus rotated and/or mirrored by different angular disparities.

Revised versions of the MRT are currently available (Vandenberg & Kuse 1978; Peters et al. 1995). In the MRT version by Peters et al. (1995), test subjects were shown one

initial figure and four comparison figures. Two figures were rotations of the target figure, the other two figures were not identical to the target figure and usually showed a mirrored figure. The task of the test person was to mark exactly the two comparison figures that corresponded to the original figure. In total, the test consisted of 24 of such items (sometimes also 12 items with two different sets), which had to be completed under time pressure (Hausmann 2007).

In the past, due to the importance of MRA described above, MRT has attracted great attention in spatial-visual and general intelligence research. Fortunately, there is considerable evidence showing that mental rotation can be trained (Uttal et al. 2013). Based on the “common process” hypothesis (Wohlschläger and Wohlschläger 1998), research on mental simulation training assumes that manual training can improve MRA. There is much empirical evidence for the effectiveness of manual training for mental rotation (Adams et al. 2014). New technologies, such as 3D computer simulations or immersive VRs, enable the implementation of manual training environments. A special feature of training with manual rotations is that immediate visual feedback is always available during the manual rotation (Adams et al. 2014), which is an important factor for the effectiveness of the training (Dihoff et al. 2003). In addition, virtual environments allow the integration of further feedback actions such as sound, change of color, size, etc. Furthermore, the technology offers extended possibilities to obtain more precise and comprehensive information about cognitive processes when solving MRT tasks. For example, Parsons et al. (2004) developed a new measurement method of virtual reality spatial rotation (VRSR) based on the stimuli from MRTs. The authors found that the cognitive processes that occur during the solving of VR-based mental rotation tasks are comparable to the cognitive processes that are activated during the solving of paper-and-pencil MRT tasks. In a later study by Kozhevnikov and Dhond (2012), the mental rotation ability in a traditional 2D non-immersive, 3D non-immersive, and 3D immersive environment was investigated and compared. The results showed that rotations around the Z-axis were processed more slowly in the immersive condition than in the non-immersive condition. According to the authors, this could be due to the additional egocentric information that could be provided in the immersive environments, which leads to a deeper processing of the stimuli. Under this assumption, the use of VR for training mental rotation could prove to be particularly advantageous.

3 Research questions

The assessment and support of MRA in VR environments is a poorly explored and implemented area despite a long research tradition and contains much undiscovered potential. An egocentric view of the rotating figures on the one hand and the possibility of interaction, e.g. manual rotations of the figures, on the other hand could lead to a significant improvement of MRA, which should also be measurable by the paper-and-pencil MRT. VR-based mental rotation tasks were created based on the self-developed 3D items to realise the virtual experience. The participants could solve the tasks in a FI environment by interacting with the 3D objects in a realistic way and make decisions regarding the equality of the figures. The expectation was that after dealing with virtual figures, an increase in MRA could be measured in a paper-and-pencil test (Peters et al. 1995). Therefore, the first research question was as follows:

- How does the virtual phase affect the mental rotation ability?

In the future, further potentials of virtual environments can be improved to become more efficient for training mental rotation ability. One such possibility would be the adaptive design of training tasks. In such an approach, the system would determine the difficulty of the given task depending on the person's solution behaviour and thereby avoid overwhelming or underchallenging the person. An important issue in this context would be the criteria used to manipulate the difficulty of the tasks. In the literature, the angular disparity of the figure is known as a difficulty-determining feature of MRT tasks (Shepard & Metzler 1971). There is also evidence that the complexity of the figures may also correlate with the difficulty of the task (Steiff et al. 2018). However, there is a lack of empirical evidence for this assertion in the MRT context, which is one of the issues addressed in this study. It was investigated in the VR context to what extent the complexity of the virtual MRT figures influences the difficulty of the tasks determined by the IRT analysis. An IRT analysis allows to calculate latent task parameters based on the solution behaviour and to place them together with the personal abilities on a logit scale. Due to its numerous advantages over classical test theory, IRT is a widely used method (Bortolotti et al. 2013) to evaluate performance data and to determine the task difficulties in adaptive test designs. This study also investigated whether the determination of difficulty by the complexity manipulation of the figures can also be confirmed by the IRT scaling of the solution data. It was formulated as a second research question:

- How does the difficulty-determining feature assumed *a priori* (the number of cuboids of an item) correlate with IRT-based difficulty determination of the tasks?

In addition, this study addressed the question to what extent the MRA can be captured directly in the VR environment. This finding is relevant for further studies since the VR environment could replace the paper-and-pencil tests. Digitally measured and stored data could be automatically evaluated and, if necessary, directly reported back to the individuals. In this regard, the following question was formulated:

- How is the MRA measured by paper-and-pencil MRT related to the MRA measured by virtual MRT?

4 Method

4.1 Participants

100 participants were recruited voluntarily. Forty-seven (47 %) were female and fifty-three (53 %) were male. Mean age of the participants in the study was 25.11 years with a standard deviation of 6.73 years (minimum 16 years, maximum 50 years). All of them were right-handed and none had ever participated in any MRT task before.

4.2 Design

The study consisted of a pre-test post-test design. It used the paper-and-pencil-based MRT for both tests. The results of the pre-test reflect the value of the original expression of the mental rotation and were compared as a reference value with the result of the post-test. Two virtual units (phases) took place between the pre-test and the post-test. The first phase was the test unit, in which the participants had to decide which two of the four figures corresponded to the given figure, but they did not receive any feedback on their response from the system. The second VR unit allowed the figures to rotate into the correct position. If the task was solved correctly, the system gave additional feedback, so a training effect could be assumed. In addition to testing the effectiveness of the VR-based mental rotation training, the study also aimed to determine the suitability of the tasks for adaptive training. To this end, the difficulties for the virtual MRT items were determined

by an IRT analysis. Furthermore, it examined whether the number of cuboids of the 3D figures could be identified as a difficulty-determining feature. Finally, the correlation between these two test variables was reported to investigate the substitutability of paper-and-pencil MRT with virtual MRT.

4.3 Materials

The materials used in the study were the MRT (Peters et al. 1995), the VRSR system, and the technology required to create the VR environment. These are described in detail in the following subsection.

4.3.1 Technology

The following technologies were used to implement the VRSR system: a head-mounted display (HMD) connected to a computer (with a 64-bit Windows 10 operating system, with an Intel(R) Core(TM) i7 2.67 GHz processor, 8 GB RAM and a NVIDIA GeForce GTX1070 graphics card), and the Leap Motion technology. The HMD used was the HTC VIVE Pro developed by HTC and Valve Corporation; the HTC headset contained two lighthouse base stations capable of tracking the HMD within a specific 5 by 5 m area by a calibration process. The Leap Motion technology is a small USB device that uses optical sensors and infrared light to track hands: it was attached to the HTC VIVE with a special bracket in the front and centre part of the HMD. It is possible to easily display hands in VR and to interact with virtual objects in a realistic way with this special configuration.

4.3.2 Mental Rotation Test

The paper-and-pencil-based MRT was used in the form modified by Peters et al. (1995) to measure mental rotation ability. The MRT of Peters et al. (1995) comprised 24 multiple-choice tasks that included 2D drawings of 3D figures. Each task contained a target figure on the far left of the page and four alternative answers on the right. The answer alternatives included two identical drawings as the target figure, shown from a different perspective, and two distractors. The test subjects' task was to mark the two comparison figures that matched the source figure.

The 24 items were divided into two halves (version A and B) and were given in paper-and-pencil form before and after the virtual phases to allow a pre- and post-test assessment of MRA and to avoid test repetition effects. The subjects who were given test version A as pre-test were given version B as post-test and vice versa. In total, half of the persons ($n = 50$) received variant A and half ($n = 50$) were given variant B as pre-tests. A maximum of 12 points could be achieved in each test version. In case of a positive training effect, the test persons should, on average, achieve better results in the post-test than in the pre-test.

4.3.3 VRSR system

Tab. 1 shows the two phases of the VRSR system with their properties. Both phases consisted of 30 items each and were based on immersive VR and Leap Motion technology. While the figures could be selected by hand in the first phase, they could be rotated and brought into the appropriate position in the second phase. The given processing time for a task was 30 seconds in the first phase and 40 seconds in the second phase, because the more complex form of interaction took more time. After the specified time had expired, the system automatically switched to the next task. If the task was not solved in the specified time interval, the system saved the task as not solved.

Tab. 1: Description of phases 1 and 2 from the VRSR

	Virtual phase 1	Virtual phase 2
Number of items	30	30
Technology	HTC VIVE + Leap Motion	HTC VIVE + Leap Motion
Form of interaction	Selection of the figures by using the hand grip	Manual rotation of the figures
Feedback	The selected figures change colour	The figures only change colour if correctly rotated
Processing time	30 sec per item	40 sec per item
Log data	solved / not solved	solved / not solved

The virtual mental rotation tasks in the two phases were developed based on the MRT items by Shepard and Metzler (1971) but were modified to increase the difficulty by varying the number of cuboids from three to six. Figure 1, for example, shows the figures with three, six and four cuboids. In terms of their structure, the virtual MRTs were similar to the classic MRT tasks.

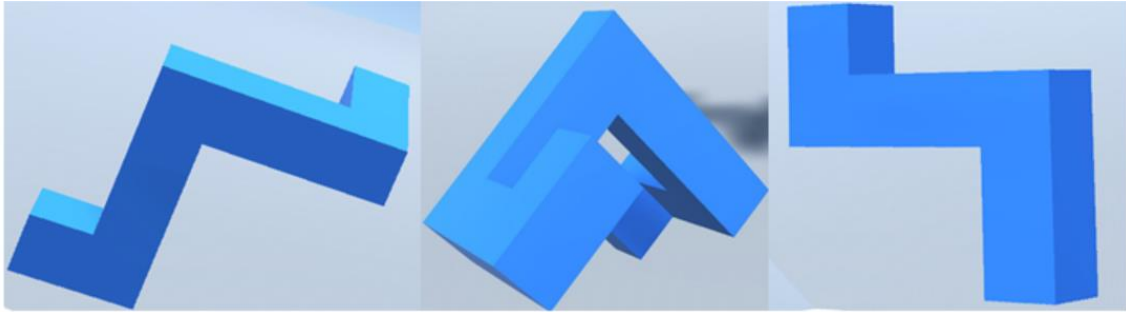


Fig. 1: Examples of the figures contained in the virtual MRT, which were constructed with software Blender according to the 3D figures of Shepard and Metzler (1971). The complexity of the figures was varied depending on the contained cuboids. The figures shown here contain three six and four cuboids.

There was also a target figure in virtual space, which was presented as green in front of a board (Fig. 2). The four blue-coloured figures represent the possible answers, which included two correct or identical figures to the target figure. In the first phase, the blue figures could be coloured green by using a handle which corresponded to the selection of correct figures. In the second phase, the blue figures could be rotated on their X, Y, and Z axes. As soon as a blue figure was placed in the same position as the green figure, it changed colour and turned green as well. The Leap Motion technology allowed the interaction (grasp or turn) to be performed by the participant's own hands. The software *Blender* and the game engine *Unity* were used to program and develop the test sequences.

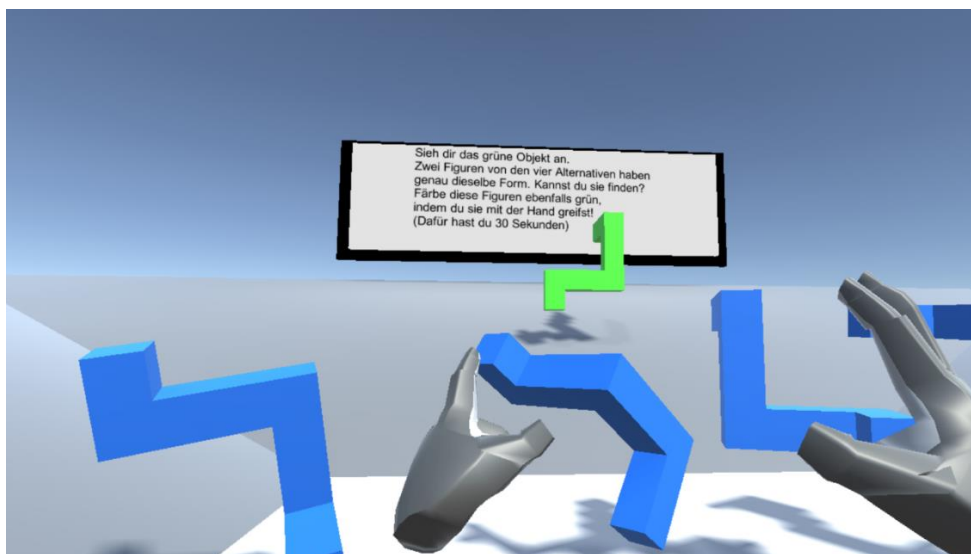


Fig. 2: A scene from the virtual MRT: According to the instructions on the task board, the test persons had to select two of four blue figures corresponding to the target figure (green figure in front).

4.3.4 Procedure

An individual examination, which was carried out in a room specially prepared for the study by an experimenter, lasted about 60 minutes and consisted of four sequences (Fig. 3).

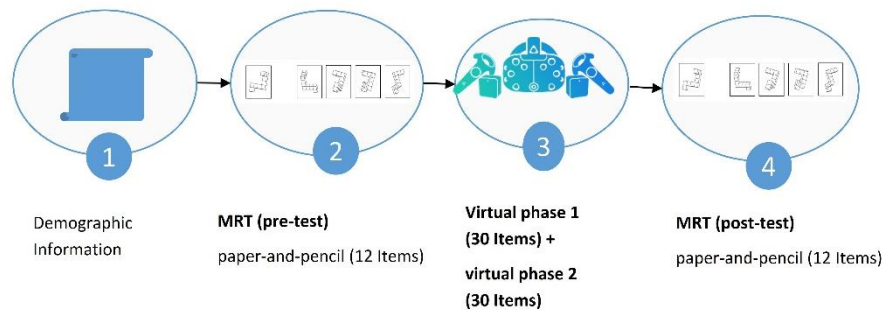


Fig. 3: Schematic illustration of the study procedure consisting of four different sequences: Demographic questionnaire, pre-test of paper-and-pencil MRT (half of the tasks from MRT according to Peters et al. 1995), virtual phases and post-test of paper-and-pencil MRT (other half of the tasks from MRT according to Peters et al. 1995).

After a greeting, a short introduction to the project, and an explanation of what the participant could expect in the next hour, the first questionnaire was handed out (sequence 1). This questionnaire was used to record the demographic information of each person. The data included, inter alia, the sex, the age, and the current educational level of the subject.

After the questionnaire was filled out, the first part of the MRT with 12 items followed (sequence 2). Each participant was given five minutes to solve the tasks in the test. A short introduction to the task was given prior to the test. The pre-test was followed by the first virtual phase (sequence 3). An example of virtual MRT task was shown to the participants by an image printed on paper. This gave them an overview of what they were going to see in VR and what the task was going to be. The analogy to the standardised test on paper was explained. For example, the green object represented the target object, and the blue figures represented the four possible answers, of which two were identical to the target object. Thus, the participant was able to see the similarities between the paper-based test and the virtual test. Subsequently, the test person was shown the technology and the acuity regulation of the HMD, with which the visual acuity in the VR space could be individually adjusted. The participant put on the HMD while the test supervisor made

sure that the HMD were firmly placed to the head. The person was turned in the correct direction so the objects and features in the exercise sequence could be seen in virtual space. In the exercise sequence, a blue figure was seen first, as well as the board on the wall on which the task was written. The participants first had to get used to the virtual world and find their way around. During this exercise, the experimenter gave instructions and hints to move the figure around and to look at it from all sides. Afterwards, the first use of the hand models simulated in virtual space followed. The simulated hand movements corresponded to the real hand movements of the participant which were tracked by the Leap Motion sensor on the HMD. In the first exercise of the first virtual phase, the test person was instructed to reach for the figure. With this particular hand movement, the blue figure was coloured green. Further exercises followed, which corresponded to the task style of the subsequent test in virtual space. A green target object and the four different blue possible answers could be seen in front of the board. Two identical figures had to be coloured by grasping them with the hand. The participant was able to mark all four blue figures in green but could not undo this. The test person therefore had to think carefully before deciding which figures should be coloured. Afterwards, the actual testing began. Each participant had to solve 30 tasks in the test, each within 30 seconds' processing time. A short break was taken at the end of the first phase before the second phase in virtual space followed. During this short break, the test person could briefly lift HMD to relax in the real environment.

The second phase followed shortly thereafter. This phase was the virtual training, as the test person now received feedback when he or she either solved the task correctly or incorrectly. The tasks and figures were identical to the tasks from the first testing phase. The difference now was that the test person had the possibility not just to reach for the figures to mark them, but also to rotate the figures. Again, there was a practice sequence before the actual training started. In the first exercise, the participant had to rotate the single blue figure seen into exactly the same position as the green target object in the background. This type of task was repeated a few times, so that the test person could get used to handling and rotating the virtual objects. This was followed by further exercises, but in the style of the subsequent training exercises. This meant the participant again had to choose two identical figures from the four alternatives and place them in the correct position, such as the green target figure. As soon as the figures were in the correct position, they turned green. The test person received feedback here, as only those figures which were identical to the target figure turn green.

After the exercise sequence, the test person was instructed to complete 30 tasks. Also, the test person did not have unlimited time for this, but exactly 40 seconds for each task. After the second phase, the virtual testing and the training in virtual space was over. The second questionnaire subsequently followed which asked participants about their personal opinions on the virtual tasks and the individual degree of difficulty was measured. Immediately afterwards, the second part of the MRT (sequence 4) was presented to the test person. As before, the person had five minutes for this test. The overall experiment ended with the last test.

5 Results

The analysis was performed with the program R (version 3.4.4) using the package “TAM” for the IRT analysis (Robitzsch, Kiefer & Wu 2019). The MRT data as well as the sum scores of the virtual MRT were normally distributed, which allowed the use of parametric t-tests for group comparison.

Table 2 shows the descriptive results (mean value, standard deviation) for all examined constructs MRT (pre-test), MRT (post-test), virtual MRT (phase 1) and virtual MRT (phase 2) to provide a first overview of the distribution of the different test scores.

Tab. 2: Descriptive results

	Maximum	possible	Mean (M)	Standard Deviation (SD)
MRT (pre-test)	12		7.36	3.1
MRT (post-test)	12		7.92	2.92
virtual MRT (phase 1)	30		13.72	5.43
virtual MRT (phase 2)	30		17.08	5.92

The impact of the virtual phase on MRA was examined to the first question of the study. It was expected the paper-and-pencil test based MRA to be higher after the virtual phase than before. This was verified using a t-test for dependent samples. The results show that the mental rotational ability after the virtual phase was significantly better than it was before the virtual phase ($t(98) = 2.222$, $p < .05$, $d = 0.224$).

It was determined whether the virtual MRT items were IRT scalable to answer the second question. The analysis was performed according to the criteria of the one-parameter, one-dimensional Rasch model (1PL model, Rasch 1960). By the analysis method, the personal abilities and the item difficulties are displayed on a common logit scale, whereby in this case, the mean value of the item difficulties marked the zero point. The personal abilities were described by a histogram, while the item parameters were arranged along the Y-axis according to their difficulty level. The test quality was assessed by WLE and EAP/PV reliabilities as well as by the weighted mean square values within the limits of $0.77 < wMNSQ < 1.33$ (Bond & Fox 2013). The results show a good fit between the model and the collected data. The EAP/PV reliability was .801 and WLE reliability .845. The weighted mean squares were between .79 and 1.19. The connection between personal skills and task difficulties was illustrated by a Wright map in Figure 4. The personal abilities and task difficulties were symmetrically distributed around the zero point and range from -3 (very easy items) to 3 (very difficult items). The Wright map also shows that the items were largely heterogeneous in terms of difficulty and covered almost the entire personal ability range, so that suitable tasks can be found from the task tool for each ability level, which is necessary for the development of adaptive training materials.

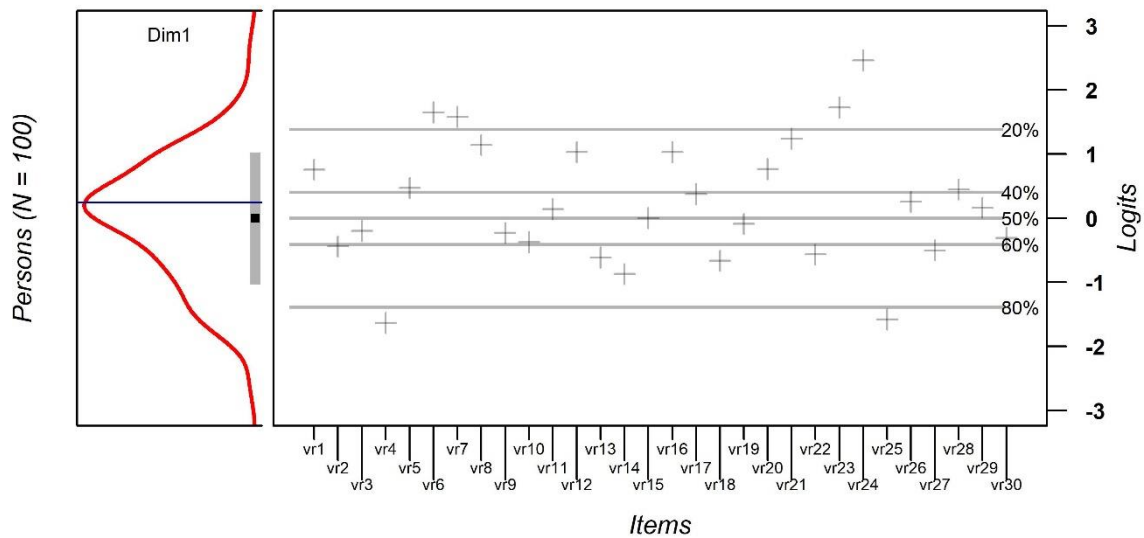


Fig. 4: Wright map: personal abilities (WLEs) are shown on the left side of the Wright map by a histogram, while the item parameters are arranged on the right side and are represented by grey crosses.

The next step to answer the second question was to investigate the relationship between item difficulty (determined by IRT analysis) and the number of cuboids in virtual MRT figures. It was expected that the number of cuboids to correlate positively with the difficulty of the task. The correlation analysis showed a significant positive correlation between the number of cuboids and the difficulty of the task ($r = .417$, $p < .05$).

Finally, it was examined whether and to what extent the paper-and-pencil test based MRA is related with the virtual MRA. To determine the virtual MRA, personal abilities (WLEs) calculated by IRT scaling the data from the first virtual phase were considered. By the analysis of correlation, a high positive correlation between MRT (pre-test and post-test) and virtual MRT (phase 1) ($r = .620$, $p < .001$) was discovered.

The results of the study confirmed the expectations. It was shown that MRA improves after the virtual phase, that the difficulty of virtual MRT items is related to the complexity of the figures (number of cuboids), and that the paper-and-pencil test based MRA is highly correlated with the MRA measured by virtual MRT.

6 Discussion

This study investigated whether and how VR can support MRA and generated findings on the VR-based, adaptive training of mental rotation ability. To this end, three main research questions were answered:

First, it had to be clarified whether virtual training improves the mental rotation ability of test persons. The results showed a significant improvement of this ability after the virtual phase, which indicates the effectiveness of VR training. However, the methodological weaknesses of the study should be pointed out here: the study design consisted of a pre-test and post-test design but lacked a control condition that could verify that the effect shown was not present without training. Simply dealing with the pre-test tasks of MRT might have led to the improvement of MRA and to better results in the post-test. This should be considered in future studies to assess the effectiveness of training.

The second objective of this study was to identify a difficulty-determining feature of virtual MRT figures. The aim was to optimise the virtual training program by making it adaptive, i.e. adapting the task difficulties to the personal abilities. Previous studies (Shepard & Metzler 1971) were able to identify the angle of rotation of the figures to the target figure as a difficulty-determining feature. It was suspected that the difficulty of the task would be additionally influenced by the complexity of the figures. It should be more difficult to mentally rotate a figure with more edges than a figure with few edges. To this end, the number of cuboids in this study varied between three and six, and then an IRT analysis was carried out to determine the difficulty of the task.

The IRT analysis made it possible to sort the test items by their level of difficulty, thus fulfilling a first condition for the adaptive design of future training sessions. As expected, the number of cuboids of a figure were found to be a difficulty-determining characteristic. However, it should be critically noted that there was no high correlation between the complexity of the figure and the difficulty of the task. This was partly due to the fact that the complexity variation of the figures was quite limited: there were only figures with three, four, five, or six cuboids. On the other hand, there were other difficulty-determining features (the rotation angle of the tasks, among others) which were not considered in the evaluation due to the small number of items and the unsuitable task. These findings also correspond to the results of Steiff et al. (2018) who showed that the complexity of the MRT stimuli increases with an increasing number of axes.

When discussing the adaptability of the training environment, it should not be forgotten that this term is generally very broad. The adaptive environments addressed here refer to the adaptation of the task difficulty depending on the solution behaviour. However, adaptation can be done in many ways. In addition to the solution behavior, other individual characteristics of the users should be considered in software development. The adaptation

of personal preferences, motivation, cognitive load, etc. could be further steps in the design of innovative learning and training environments.

Third, the connection between paper-and-pencil MRTs and virtual MRTs to validate virtual MRTs was analysed. The correlation analysis revealed a highly significant correlation. It can therefore be presumed that a VR environment can determine the mental rotation ability and can replace paper-and-pencil MRTs for future investigations. Digitally measured and stored data could be automatically evaluated and, if necessary, directly reported back to the individuals. Digital assessment opens up the possibility of making research and training environments to support MRT more efficiently by directly storing, processing, and evaluating the data and making certain adjustments if necessary. This saves time, costs, and makes the environment more flexible.

The results of the study confirm the expectations and provide subsequent results for the development of optimised VR-based mental rotation training. The training can consider the potentials of VR environments by being interactive and adaptive and by increasing user motivation through feedback.

7 Summary

This study investigated a possibility for a VR-based measurement and improvement of mental rotation ability. In addition, decisive findings were generated to develop adaptive support training. To realise this, a VR-based environment was designed in which a virtual MRT based on classical MRTs (Peters et al. 1995) needed to be solved by participants. Virtual figures were designed with different degrees of difficulty by manipulating the number of cuboids by what were a priori assumed difficulty determining attributes. The virtual sequence was divided into two phases. In the first phase, the virtual mental rotation ability was recorded, while in the second phase, the participant was trained by the additional interaction possibilities with virtual figures. At the beginning and at the end of the investigation, the mental rotation ability was measured by using paper-and-pencil MRTs to identify possible training effects. The investigation aimed to answer the following questions:

- How does the virtual phases affect the mental rotation ability?
- How do difficulty-determining feature assumed *a priori* (the number of cuboids of an item) correlate with IRT-based difficulty determination of the tasks?

- How is the MRA measured by paper-and-pencil MRT related to the MRA measured by virtual MRT?

The results of the study confirmed the expectations and showed that MRA improved after the virtual phase. Furthermore, the findings reveal that the difficulty of virtual MRT items is related to the complexity of the figures (number of cuboids) and that the paper-and-pencil test based MRA is highly correlated with the MRA measured by virtual MRT. As a next step, the findings of the study should be incorporated into the development of an adaptive training environment of the MRA.

References

- Adams, D. M., Stull, A. T., & Hegarty, M. (2014). Effects of Mental and Manual Rotation Training on Mental and Manual Rotation Performance. *Spatial Cognition & Computation*, 14(3), 169–198.
- Ariali, S. & Zinn, B. (2018). Virtuelle Umgebungen zur Analyse der mentalen Rotationsfähigkeit. *Journal of Technical Education (JOTED)*, 6(4), 7–29.
- Ariali, S. & Zinn, B. (2020.). Virtual Reality – eine Studie zur chronometrischen Analyse der mentalen Rotationsfähigkeit. In B. Zinn (Hrsg.), *Virtual, Augmented und Cross Reality in Praxis und Forschung. Technologiebasierte Erfahrungswelten in der beruflichen Aus- und Weiterbildung* (243–256). Stuttgart: Franz Steiner Verlag.
- Bond, T. G., & Fox, C. M. (2013). *Applying the Rasch Model: Fundamental Measurement in the Human Sciences*, Second Edition. Psychology Press.
- Bortolotti, S. L. V., Tezza, R., de Andrade, D. F., Bornia, A. C., & de Sousa Júnior, A. F. (2013). Relevance and advantages of using the item response theory. *Quality & Quantity*, 47(4), 2341–2360.
- Castro-Alonso, J. C., & Uttal, D. H. (2019). Science Education and Visuospatial Processing. In J. C. Castro-Alonso (Hrsg.), *Visuospatial Processing for Education in Health and Natural Sciences* (53–79). Springer International Publishing.
- Cipresso, P., Giglioli, I. A. C., Raya, M. A., & Riva, G. (2018). The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature. *Frontiers in Psychology*, 9, 1–20.
- Dan, A. & Reiner, M. (2017). EEG-based cognitive load of processing events in 3D virtual worlds is lower than processing events in 2D displays. *International Journal of Psychophysiology*, 122, 75–84.
- Dede, C. (2009). Immersive Interfaces for Engagement and Learning. *Science*, 323(5910), 66–69.
- Dihoff, R. E., Brosvic, G. M., & Epstein, M. L. (2003). The Role of Feedback During Academic Testing: The Delay Retention Effect Revisited. *The Psychological Record*, 53(4), 533–548.
- Dünser, A., Steinbügl, K., Kaufmann, H., & Glück, J. (2006). Virtual and augmented reality as spatial ability training tools. *Proceedings of the 7th ACM SIGCHI New Zealand chapter's international conference on Computer-human interaction: design centered HCI*, 125–132.

- Eliot, L. (2017). Was geht da drinnen vor?: Die Gehirnentwicklung in den ersten fünf Lebensjahren. Piper ebooks.
- Fuchs, P. (2017). *Virtual Reality Headsets—A Theoretical and Pragmatic Approach*. CRC Press.
- Ganis, G., & Kievit, R. (2015). A New Set of Three-Dimensional Shapes for Investigating Mental Rotation Processes: Validation Data and Stimulus Set. *Journal of Open Psychology Data*, 3(1), 1–7.
- Goktepe Y. S., & Ozdemir, A. S. (2020). The effects of engineering design processes on spatial abilities of middle school students. *International Journal of Technology and Design Education*, 30(1), 127–148.
- Hagen, I. (2017). Perception Virtuality. In: Eibl, M. & Gaedke, M. (Hrsg.), *INFORMATIK 2017 (2525–2536)*. Bonn: Gesellschaft für Informatik.
- Halpern, D.F. (2000). *Sex differences in cognitive abilities (3rd Ed.)*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Hausmann, M. (2007). Kognitive Geschlechtsunterschiede. In S. Lautenbacher, O. Güntürkün, & M. Hausmann (Hrsg.), *Gehirn und Geschlecht: Neurowissenschaft des kleinen Unterschieds zwischen Frau und Mann (105–123)*. Springer.
- Hegarty, M., & Waller, D. A. (2005). Individual Differences in Spatial Abilities. In P. Shah & A. Miyake (Eds.), *The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking (121–170)*. Cambridge University Press.
- Heil, M., & Rolke, B. (2002). Toward a chronopsychophysiology of mental rotation. *Psychophysiology*, 39(4), 414–422.
- Jäncke, L., & Jordan, K. (2007). Functional Neuroanatomy of Mental Rotation Performance. In F. Mast & L. Jäncke (Hrsg.), *Spatial Processing in Navigation, Imagery and Perception (183–207)*. Springer US.
- Korgel, D. (2017). *Virtual Reality-Spiele entwickeln mit Unity? München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG*.
- Kozhevnikov, M., & Dhond, R. P. (2012). Understanding Immersivity: Image Generation and Transformation Processes in 3D Immersive Environments. *Frontiers in Psychology*, 3, 1–10. Online: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2012.00284>
- Kozhevnikov, M., Schloerb, D. W., Blazhenkova, O., Koo, S., Karimbux, N., Donoff, R. B., & Salcedo, J. (2013). Egocentric versus Allocentric Spatial Ability in Dentistry and Haptic Virtual Reality Training. *Applied Cognitive Psychology*, 27(3), 373–383.
- Lane, D., Lynch, R. & McGarr, O. (2019) Problematizing spatial literacy within the school curriculum. *Int J Technol Des Educ* 29, 685–700.
- Linn, M., & Petersen, A. (1985). Emergence and Characterization of Sex Differences in Spatial Ability: A Meta Analysis. *Child Development*, 56(6), 1479–1498.
- Mix, K. S., Levine, S. C., Cheng, Y.-L., Young, C., Hambrick, D. Z., Ping, R., & Konstantopoulos, S. (2016). Separate but correlated: The latent structure of space and mathematics across development. *Journal of Experimental Psychology: General*, 145(9), 1206–1227.
- Mohler, J. L. (2000). Desktop Virtual Reality for the Enhancement of Visualization Skills. *Journal of Educational Multimedia and Hypermedia*, 9(2), 151–165.
- Murcia-López, M. & Steed, A. (2016). The Effect of Environmental Features, Self-Avatar, and Immersion on Object Location Memory in Virtual Environments. *Frontiers in ICT*, 3. Online: <https://doi.org/10.3389/fict.2016.00024>
- Nico, D. & Daprati, E. (2009). The egocentric reference for visual exploration and orientation. *Brain and Cognition*, 69(2), 227–235.

- Parsons, T. D., Larson, P., Kratz, K., Thiebaut, M., Bluestein, B., Buckwalter, J. G., & Rizzo, A. A. (2004). Sex differences in mental rotation and spatial rotation in a virtual environment. *Neuropsychologia*, 42(4), 555–562.
- Pausch, R., Proffitt, D. & Williams, G. (1997). Quantifying Immersion in Virtual Reality. In Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (13–18). New York: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- Peters, M., Laeng, B., Latham, K., Jackson, M., Zaiyouna, R., & Richardson, C. (1995). A Redrawn Vandenberg and Kuse Mental Rotations Test - Different Versions and Factors That Affect Performance. *Brain and Cognition*, 28(1), 39–58.
- Potkonjak, V., Gardner, M., Callaghan, V., Mattila, P., Guetl, C., Petrović, V. M., & Jovanović, K. (2016). Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review. *Computers & Education*, 95(Supplement C), 309–327.
- Rasch, G. (1960). *Studies in mathematical psychology: I. Probabilistic models for some intelligence and attainment tests*. Oxford, England: Nielsen & Lydiche.
- Rey, G. D. (2009). *E-Learning. Theorien, Gestaltungsempfehlungen und Forschung*. Bern: Hans Huber
- Rheingold, H. (1992). *Virtuelle Welten: Reisen im Cyberspace*. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt.
- Robitzsch, A., Kiefer, & T., Wu, M. (2019). TAM: Test Analysis Modules. R package version 3.3-10.
- Schuster, K. (2015). Einfluss natürlicher Benutzerschnittstellen zur Steuerung des Sichtfeldes und der Fortbewegung auf Rezeptionsprozesse in virtuellen Lernumgebungen. Marburg: Tectum Wissenschaftsverlag.
- Sella, F., Sader, E., Lollot, S., & Cohen Kadosh, R. (2016). Basic and Advanced Numerical Performances Relate to Mathematical Expertise but Are Fully Mediated by Visuospatial Skills. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 42(9), 1458–1472.
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental Rotation of Three-Dimensional Objects. *Science*, 171(3972), 701–703.
- Sorby, S. A., & Baartmans, B. J. (1996). Improving The 3 D Spatial Visualization Skills Of Women Engineering Students Paper presented at 1996 Annual Conference, Washington, District of Columbia.
- Sorby, S. A., & Baartmans, B. J. (2000). The Development and Assessment of a Course for Enhancing the 3-D Spatial Visualization Skills of First Year Engineering Students. *Journal of Engineering Education*, 89(3), 301–307.
- Sorby, S., Casey, B., Veurink, N., & Dulaney, A. (2013). The role of spatial training in improving spatial and calculus performance in engineering students. *Learning and Individual Differences*, 26, 20–29.
- Stieff, M., Origenes, A., DeSutter, D., Lira, M., Banevicius, L., Tabang, D., & Cabel, G. (2018). Operational constraints on the mental rotation of STEM representations. *Journal of Educational Psychology*, 110(8), 1160–1174.
- Thalmann, S. (2014). Adaptation criteria for the personalised delivery of learning materials: A multi-stage empirical investigation. *Australasian Journal of Educational Technology*, 30(1).
- Uttal, D. H., Meadow, N. G., Tipton, E., Hand, L. L., Alden, A. R., Warren, C., & Newcombe, N. S. (2013). The malleability of spatial skills: A meta-analysis of training studies. *Psychological Bulletin*, 139(2), 352–402.
- Vandenberg, S. G. & Kuse, A. R. (1978). Mental Rotations, a Group Test of Three-Dimensional Spatial Visualization. *Perceptual and Motor Skills*, 47(2), 599–604.

- Veurink, N. L., & Sorby, S. A. (2019). Longitudinal study of the impact of requiring training for students with initially weak spatial skills. *European Journal of Engineering Education*, 44(1–2), 153–163.
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625–636.
- Wohlschläger, A., & Wohlschläger, A. (1998). Mental and manual rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(2), 397–412.
- Zacks, J. M. & Michelon, P. (2005). Transformations of Visuospatial Images. *Behavioral and Cognitive Neuroscience Reviews*, 4(2), 96–118.

2.3 Publikation 3

Adaptive Training of the Mental Rotation Ability in an Immersive Virtual Environment

Abstract— Virtual reality (VR) opens new possibilities for the investigation and training of the mental rotation ability (MRA), which is an important factor in the development of technical skills in several fields. Adaptive designs of MRA training environments realised by virtual technology, which are investigated in this study, could offer promising potentials. For the evaluation of the effectiveness, the adaptive training environment is compared with the adequate randomised environment by assessing the mental rotation ability in both conditions before and after training. As a dependent variable, the performance and its improvement in the virtual mental rotation test (VMRT), as well as the cognitive load, are measured. In addition, possible gender differences and their influence on the training outcomes are determined. The study described here represents an innovative support option for MRA and provides an expandable empirical basis for VR-based adaptive trainings.

1 Introduction

Virtual realities (VR) are becoming increasingly more important for learning and educational purposes [1]. The reasons for this are the technological developments of recent years on the one hand, and VR's property of being applicable in many different contexts on the other hand. Examples of VR use in educational contexts are virtual laboratories that support the acquisition of certain skills and practical experience [2] or the possibility of training in environments that would be too dangerous in reality [3], [4]. A special characteristic of VR is the egocentric representation of the environment and the use of a head-mounted display (HMD) which gives the user the feeling of being in "real" reality. Under certain circumstances this can increase the user experience, perceived competence, benefits, and motivation of learners [5]. In addition, immersive virtual technologies enable the use of natural user interfaces (e.g., Leap Motion, data gloves, etc.) to interact with virtual objects and imitate a real haptic touch. Virtual environments also offer a wide range of design options for training and learning scenarios. For example, there are options for the adaptive design of the training environment regarding the difficulty of the content being customised during the training process to reflect the skills, preferences, motivation,

or other characteristics of the student. This can reduce the cognitive load while improving the overall performance [6].

In light of the advantages described above, VR offers the possibility of creating training sessions that require realistic interaction with the environment while being equipped with advanced features at the same time. The training of the mental rotation ability (MRA) is one of these possibilities. MRA, as an important part of the spatial imagination and thus of human intelligence, is a prerequisite in many scientific and technical professions [7]. Previous research has shown a marked gender difference to the detriment of women [8], [9]. Nonetheless, MRA can be supported by means of appropriate training programs [10]. The possibility to train MRA in VR with the help of adaptively designed materials offers an interesting research field in this regard and holds practical potentials.

This study investigates the effectiveness of VR-based adaptive training, which was developed to support MRA. During training, the test subjects had to detect the similarity of three-dimensional figures and rotate them into the correct positions. In order to ensure the adaptivity of the training environment, the next task became more difficult if the previous task was solved correctly (if the upper difficulty limit had not already been reached) and easier if it was not solved correctly (if the lower difficulty limit had not already been reached). Adaptive training was compared with randomised training, in which the training tasks were presented in no particular order.

In order to test the effectiveness of training, a previously validated virtual test instrument for measuring MRA [11], the so-called virtual mental rotation test (VMRT), was used before and after training. It was assumed that the participants will achieve better results in VMRT after the virtual training than before the training if the training has a positive influence on MRA. This improvement should be stronger in the adaptive condition than in the randomised condition. Additional tests examined the cognitive load in different conditions as well as gender-specific differences. Following the introduction, this paper will firstly provide an overview of the theoretical background and related work. Subsequently, the research questions of the current study are formulated. Next, the methodological approach of the study is explained in the third section, followed by a report on the results in the fourth section. In the fifth section, the central findings are discussed before finally summarising the study.

1.1 VR-Technology

The rapid development and dissemination of new technologies in recent decades is linked to the optimisation of educational processes. With the integration of digital technologies, learning and work processes can be improved by making them more flexible and individualised. One of these technologies is VR, which is no longer a novelty but has experienced a strong developmental thrust and spread in recent years. VR is a computer-generated three-dimensional (3D) representation of real or fictitious environments in which the user can enter and execute nearly realistic actions. Modern technologies offer the possibility to “dive” into these environments and get the feeling of actually being “there”. This feeling is described as immersion, which Freina and Ott [12] define as the feeling of being physically present in a non-physical world. Depending on the degree of immersion, currently existing VR systems are divided into three categories: non-immersive (desktop), semi-immersive, and fully immersive systems [13]. In contrast to the desktop-based representation (non-immersive technology), the special feature of immersive virtual environments is that the user can view the surroundings from an egocentric, i.e. “I” perspective, which corresponds to a realistic perception of the environment and its objects [14]. This is usually enabled by using an HMD, also known as VR goggles. While fully immersive VR technology enables a wide range of interactions with virtual objects, the possibilities for interaction in semi-immersive environments are limited as they are mostly realised by means of low-budget devices as well as smartphones and contain only few natural user interfaces. Technological examples for the realisation of semi-immersive environments are Google Cardboard or the VR goggles Samsung Gear. The multiple possibilities for interaction with fully immersive technology (i.e. HTC VIVE) is provided by an HMD connected to the PC, space-scanning infrared cameras, and special controllers. Via the controllers, the users can interact with the virtual 3D objects, take actions, and move within the virtual space. In order to enhance the feeling of immersion, VR technology can be extended with additional natural user interfaces. As an example, the Leap Motion technology, which is attached to the front of the HMD, can track the user’s hands and transfer them as models into a VR environment. In this case, controllers are no longer needed, as users can interact with the virtual objects by means of their own hands. Although fully immersive virtual environments offer numerous advantages for the user compared to non-immersive or semi-immersive environments, they are not always the means of choice for economic reasons. Fully immersive VR technology, such as HTC VIVE, is quite expen-

sive, requires a powerful PC, and the use of a room-scanning infrared camera is cumbersome. In addition, programming realistic 3D models and integrating interaction options is complex and requires programming skills, even though current game engines, such as Unity3D or Unreal Engine, use a visual scripting system and an intuitive editor to build simple games without writing code. Many finished scripts are also available as open source.

Despite the high costs and efforts involved, the importance of virtual technology in the education sector is so high that it is even described as the number one learning tool of the 21st century [15]. This is due to its unique characteristics, providing several advantages for education and research. As an example, VR allows for the simulation of realistic but fictitious environments that would be impossible or too dangerous under real conditions [16]. Furthermore, VR enables the modification of parameters that often cannot be changed in a real system [2]. Examples of modifiable parameters are gravity, colour, or size, which can be set by default or varied according to individual preferences. An additional advantage of using computer-generated environments is the ability to automatically log and analyse study-relevant data, which is an efficient alternative to other data collection methods [17]. VR also offers the possibility to take the collected data into account and adapt the learning environment to the needs of the user.

The above-mentioned advantages of virtual environments, in combination with years of research results, provide an opportunity for using VR to train certain skills or as a supplement to real or computer-based training environments. Such a form of training has partly already been implemented [1]. However, it requires more detailed research as well as the identification of weaknesses and strengths in order to enable extensive use. Applications of virtual environments for training spatial skills have also often been addressed in research. With respect to spatial orientation, there is a number of studies that show the benefits of virtual environments for the training of spatial skills [18], [19]. The researchers assume that, in order to orientate themselves in a virtual environment, people rely on the same cognitive process as they do in a real environment [20]. While graphically complex and expensive virtual environments, in which walking around and exploring the surroundings is recommended, are suitable for spatial orientation, a further dimension of spatial abilities, the mental rotation ability, can be assessed with simple stimuli. Therefore, especially MRA is frequently examined in connection with virtual environments and is thus described in the next chapter.

1.2 Mental rotation ability

The term MRA refers to the ability to rotate 2D or 3D figures and objects mentally [21]. It is allocated to the realm of spatial abilities which are an aspect of human intelligence [22]. Spatial ability means being capable of storing, retrieving and transforming visual-spatial information [23]. There are various theories and models of spatial abilities. Thurstone [24], for example, postulates a three-factor hypothesis according to which visualisation, spatial relations, and spatial orientation are the three most important subfactors of spatial ability. Another important definition of spatial ability comes from Linn and Petersen [21], who also identify three subfactors of the construct, including spatial perception, mental rotation, and spatial visualisation. Carroll [25] divides spatial abilities into five main factors, comprising spatial visualisation, spatial relationships, closing speed, the flexibility of closing, and perceptual speed. Despite these discrepancies, mental rotation is a component of all these models and theories. It is the ability to mentally rotate the representation of a stimulus in order to imagine what an object looks like from a different perspective [26].

A frequently used diagnostic possibility for measuring MRA is the mental rotation test (MRT), according to Shepard and Metzler [26], in the version by Peters et al. [27]. The 24 MRT items consist of 3D cube constructions. For each test item, a given figure is compared with four other figures on the right-hand side. Two figures on the right are rotations of the target figure, and the other two figures are not identical to the target figure. The two rotated versions should be recognised by the test persons. Then, and only then, if both versions are correctly recognised, one point per item is awarded so that the maximum score in the MRT is 24.

The research indicates the importance of MRA for technical professions [28]. Sorby et al. [29], Sorby and Baartmans [30] and Veurink and Sorby [31], for example, show that improving spatial skills, especially MRA, can lead to a better performance in mathematics, computer science, science, and technology. Other authors also find significantly high positive correlations between mathematical skills and spatial abilities [32], [33].

An important characteristic feature of MRT is gender differences [9]. With the paper-and-pencil MRT of Shepard and Metzler [26], the disadvantage of women compared to men in the realm of mental rotation was detected for the first time and has been proven several times ever since. Modern computer-based MRT also confirms these results [34]. Gender

differences in spatial abilities are well documented but have not yet been adequately explained. Various explanations are given, which are based on biological [35], [36], environmental [37], or psychobiological aspects [7]. One of these explanations refers to the way the tasks are presented [38]. The paper-and-pencil or screen-based representations of the MRT are exclusively allocentric. There is evidence that women have difficulties with such representations. Consequently, if the mental rotation figures were represented from the egocentric perspective, they would perform as well as men [39]. With VR technology, new presentation possibilities for MRT are emerging that did not exist before or that were technologically complex and expensive. With the help of immersive technology, Shepard's and Metzler's [26] stimuli (cube figures) could also be viewed from an egocentric perspective. This opens new possibilities to fundamentally investigate spatial imagination and gender differences in MRT tasks.

Due to its importance in many areas, the support of mental rotation constitutes an important area of research. Meanwhile, there is ample evidence that MRA can be improved by training [10], [40]–[42] and that the effects of training can be transferred to other tasks [43]. According to some authors, cognitive processes underlying mental rotation are linked to actual physical rotation and can activate corresponding motor processes. Wohlschläger and Wohlschläger [44] propose that mental and manual rotations are based on a common process. The authors point to a number of studies that found a correlation between the reaction times of manual and mental rotations. Based on this common process hypothesis, it can be assumed that manual training is able to improve MRA. This assumption is supported by a study by Wiedenbauer et al. [41] in which the authors develop a training task requiring the participants to align the orientations of two Shepard and Metzler stimuli using a joystick. The manual training resulted in a better mental rotation performance with familiar objects. Meanwhile, there is further evidence for the effectiveness of manual training for MRA [40].

The realisation and investigation of manual training environments of MRA are challenging in real conditions because of the difficult standard operability and control of environmental confounding variables. The immersive virtual realities, in combination with data gloves or leap-motion technology, make it possible to realise training environments that enable the elimination or control of the disturbing variables and allow the standardisation of relevant parameters. Additionally, virtual environments offer the possibility to adapt the learning content to the skills and needs of the users by means of automated evaluation

of the data. This kind of designing and learning environments is called adaptive and is described in detail in the next section.

1.3 Adaptive training environments

Adaptive learning is a kind of learning process in which the learning content is changed or adapted based on the reactions of the learner [45]. Accordingly, adaptive training can be described as training that matches individual differences with training instructions [46]. In an adaptive training scenario, the order, pace, or difficulty of the content can be tailored individually during the training process – for example, to the skills, preferences, or motivation of the student – in order to increase training efficiency [47]. The concept of adaptive training is very broad, and there are already many realisations accompanied by a long research tradition. Research indicates that adaptive training can be effective in general when compared to non-adaptive training [48], [49]. The effectiveness of adaptively designed training environments can be supported by the cognitive load theory (CLT, [50]). This theory is based on the human memory architecture model of Baddeley [51] and assumes that the working memory capacity is limited. The CLT distinguishes three types of working memory loads. Sweller [52] describes the load caused by the type of learning material as intrinsic load. This load increases with the number of elements that are simultaneously present in the working memory, whereby the extent of the intrinsic load also depends on the level of expertise of the learner. The second load specified in the CLT is the extrinsic load. This can be directly influenced by the instructional design of the learning material. The cognitive effort involved in automating schemata also results in the learning-related load (germane load). The goal of CLT-based training is to increase the germane load and decrease the extraneous load. According to CLT, the use of adaptive training should relieve working memory and promote germane load, as it is tailored to the individual needs and abilities of the learner [6].

Personalisation of virtual environments entails a number of advantages which are known in the gaming industry [53]. Adaptability can be used to prevent learners from being overloaded or too distracted by irrelevant content, which could increase the flow experience. Additionally, the learning effect could be increased by adapting the complexity of the content presented in virtual reality according to the learner's abilities.

The idea of adaptively designing learning materials presented in virtual form is not new [54], but research in this area is still in its infancy [55]. The aim of this study is to examine

a simple form of personalised training and compare it with non-personalised training. The variables of gender and cognitive load are going to be considered and included in the regression analysis.

2 Current study

Based on the state of the research described above, an adaptive design of the virtual training environment to promote mental rotation has a high practical relevance and raises new research questions. First, it has to be questioned whether virtual training can improve MRA. In order to investigate this, this study uses a pretest-posttest design examining whether an increase in performance is achieved. It is expected that a significant improvement in MRA will occur after a virtual training session. Therefore, the first hypothesis is as follows:

H1: A higher MRA can be measured after training than before training.

Next, it has to be checked whether the adaptive design of the training environment has an advantage over the randomised environment, which serves as a control condition in this study. It is assumed that training in the adaptive condition leads to a higher increase in MRA than in the randomised condition. This assumption is based on the circumstance that in an adaptive environment, the difficulty of the given task is determined by the person's solution behaviour, thus avoiding over- or underchallenging the person. In addition, the person to be trained has the possibility to solve the mental rotation tasks within his or her own scope in order to achieve better training effects. Therefore, in the second hypothesis, it is assumed that significantly higher increases in MRA will be measured after adaptive training than after randomised training. Therefore, the following hypothesis is established:

H2: The increase in ability is higher in the adaptive condition than in the randomised condition.

Given the adaptability of the task difficulty to the abilities of the user, it could be hypothesised that the overall cognitive load in the adaptive condition is lower than in the randomised condition. Under certain circumstances, this should also be measurable with subjective measurement methods after the virtual phases. For this purpose, the cognitive load

is assessed in addition to MRA and checked for group differences. Hence an additional question follows:

Do different groups differ in cognitive load?

Considering that gender is an important variable in the context of mental rotation, it is investigated whether gender differences can be identified by virtual MRT and by cognitive load (measured by NASA-TLX), and how they develop under different training conditions. From this, the supplementary question of the study is derived:

Are there gender differences in relation to performance in virtual MRT and/or cognitive load?

3 Method

3.1 Participants

102 persons participated in the study. 51 of them (50%) were female, and the other 51 (50%) were male. The mean age of the participants in the study was 27.74 years with a standard deviation of 5.66 years (minimum 18 years, maximum 47 years). 47 of 102 participants already had a university degree and 30 participants had a high school diploma. The remaining participants had other degrees. When asked how often they used 3D computer games, 67 of 102 test persons stated "never", 18 "very rarely", 12 "occasionally" and 4 "almost daily." One person did not provide any information in this regard.

3.2 Design

The study consists of a pretest-posttest experimental-control group design. The adaptive training serves as an experimental condition and the randomised training as a control condition. Before and after the training session, the MRA of the participants is recorded using a virtual MRT which was developed and validated in the previous study [11]. Finally, the cognitive load of the persons is recorded using the NASA TLX questionnaire. Figure 1 shows a graphic representation of the course of the investigation.

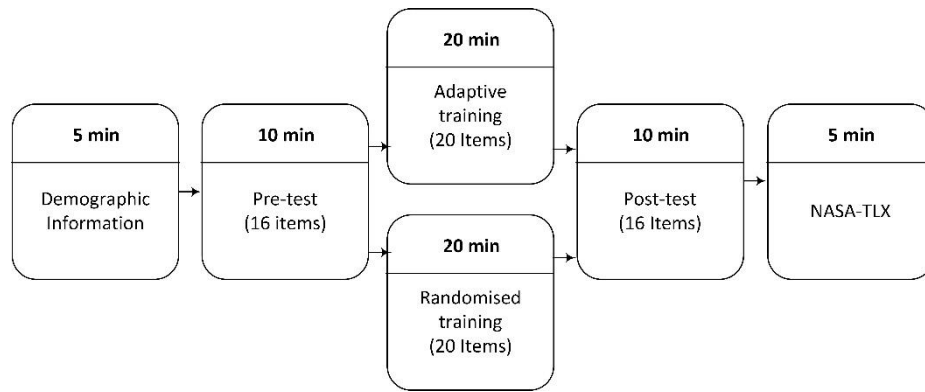


Fig. 1. Course of the study session

3.3 Materials

The materials used in the study were VR-based mental rotation test and training environments, the technology required to run the VR environments and the NASA TLX questionnaire as well as the questionnaire on demographic information. These are described in detail in the following subsection.

VR-based mental rotation ability test environment

The VMRT used for the pre- and post-measurement of the mental rotation ability was developed and validated in a previous study [11]. The test instrument contained 16 items based on immersive VR and leap-motion technology. Similar to the paper-and-pencil MRT items [27], the test subjects have to choose two out of four figures corresponding to the target figure. The selection of the figures is possible by grasping them by hand. After the selection, the figures change their colour from blue to green (regardless of whether they are selected correctly or incorrectly) and it is no longer possible to undo this. The given processing time for each task is 30 seconds. After the given time is over, the system automatically goes on to the next task. Finally, the participants are instructed to report to the test supervisor. The instructions are displayed on a board behind the target figures (Figure 2).

VR-based mental rotation ability training environments

The training of the MRA is enabled by the hands-on interaction with the 3D figures. The persons have the possibility to rotate the figures with their own hands to bring them into a particular position. The goal in the training phase is – similar to the test phase – to find two of four blue figures corresponding to the green figure and to bring them into the same position as the green figure (Figure 2). As soon as the angle of rotation in all three axes

(X, Y, and Z axes) is matched (provided the rotated figure was the right choice), the blue figure also changes its colour to green. Maximum deviation tolerance of the turned figure from the target figure is 30 degrees in each axis. If two out of four figures are green, it can be assumed that the task was solved correctly, providing feedback on the task solution. The given time for solving a training task is 40 seconds. After this time, the system automatically switches to the next task. The determination of the next task depends on the solution behaviour of the previous task and the experimental condition. At the beginning of the training, the persons in the adaptive condition are given a task of medium difficulty. If the task is solved in a given time, they will receive more difficult tasks or equally difficult tasks (if the upper difficulty limit is reached). Nevertheless, if the task is not solved, they will receive easier tasks or equally difficult tasks (if the lower difficulty limit is reached). For the difficulty variation of the tasks, the items are selected from four different item pools. The 3D figures in the item pool with the highest level of difficulty consists of six cuboids, while those in the item pool with the lowest level of difficulty are made up of three cuboids. Figure 2, for example, shows the figures with three cuboids.

In the randomised condition, the task is the same as in the adaptive condition. The difference is that in this condition, the tasks from four different item pools are presented randomly, regardless of whether the person has solved the previous task or not.

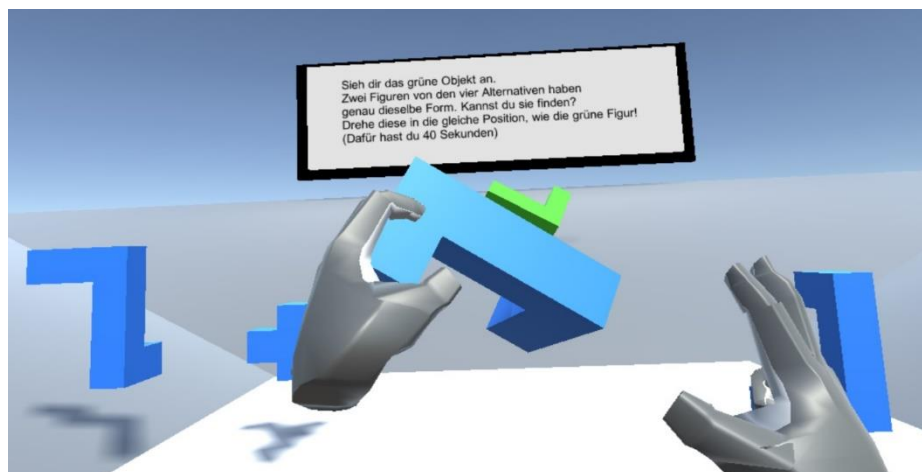


Fig. 2. Scene from the training sequence

Technology

For the implementation of the software required for the current study, the programme Blender is used to generate the 3D figures, whereas the game engine Unity3D is employed to design the test and training environments.

In order to display the VR-based mental rotation test and training environments, a VR device (HTC VIVE Pro) is connected to a laptop (with a 64-bit Windows 10 operating system, an Intel(R) Core(TM) i7 2.67 GHz processor, 8 GB RAM and an NVIDIA GeForce GTX1070 graphics card) and Leap Motion technology is used. Leap Motion Technology is a small USB device that relies on optical sensors and infrared light to track hands. It is attached to HTC VIVE with a special bracket in the front and middle part of the HMD. Due to this special configuration, it is possible to display hands in VR and to realistically interact with virtual objects.

NASA-TLX

The NASA task load index (NASA TLX) [56] is used to assess the subjective perceived cognitive load during virtual activity. The authors chose the NASA TLX because it is a standardized multidimensional questionnaire used to measure perceived workload during a task in order to estimate various aspects of performance, including cognitive load. The NASA TLX usually includes six different dimensions: mental demand, physical demand, temporal demand, performance, effort, and frustration level. In this experiment, the scale of physical demand is not considered because it is not relevant for the performance of the task. Instead, the participants rate the other dimensions from low to high on a scale of zero to twenty. As expected in the study, the test subjects have to report a lower cognitive load if they receive the tasks that correspond to their respective abilities, and vice versa: The participants will have a higher mental workload if they perform tasks that go beyond their abilities.

3.4 Procedure

The testing and the training take place in a room prepared for the study, where the participants have enough space to move around in the virtual room and view the tasks from different perspectives. First, the test persons fill out a questionnaire on demographic data. After this, they can put on the VR goggles while the test leader makes sure that the HMD is correctly positioned on the head. Before the subjects receive their first VMRT, they complete an exercise sequence consisting of five tasks. This sequence serves to familiarise the subjects with the virtual environment and starts with a scene in which only a single blue figure and the instruction board are visible. The task is to grasp the figure by hand,

after which the figure turns green. During this exercise, the test leader gives instructions suggesting to walk around the figure and look at it from all sides.

Further exercises follow that correspond to the tasks of the subsequent VMRT test. In front of the board, a green target object and four different blue answer options are visible. Two identical figures have to be coloured by grasping them by hand. The participants can mark all four blue pieces green but are not able to undo the action. Therefore, they have to think carefully before deciding which figures they choose to colour. The given time for each exercise is 60 seconds. Then the actual test begins. Each participant has to solve 16 tasks in the test, each within 30 seconds of processing time. At the end of the first phase, a short break is given before the training phase in 3D space follows.

In this phase, every second participant is assigned to an adaptive condition, the other half to the randomised condition. Additionally, in the training phase, there is a first exercise sequence before the training tasks. In the first exercise, the participants have to rotate the single blue figure they are presented with into the same position as the green target object in the background. This type of task is repeated several times so that the test persons are able to familiarise with the handling and rotation of the virtual objects. This is followed by the actual training tasks (20 in total), which, according to the condition, are either presented adaptively or randomly. After the test phase, there is a short break. Then the second VMRT test follows, which is identical to the first test. The whole experiment ends with the NASA-TLX questionnaire.

4 Results

The analysis is carried out with the programme R (version 3.4.4). The packages used are “TAM” [57] for the IRT analysis and “nlme”[58] for the analysis of variance with the linear mixed-effects model. Both of the considered dependent variables, namely the VMRT scores and the NASA TLX data, are normally distributed, allowing the use of methods like IRT analysis, ANOVA (analysis of variance), and t-test.

For the determination of MRA before and after the training, IRT analyses of the solution data are carried out at both times. The analysis is performed according to the criteria of the one-parameter, one-dimensional Rasch model (1PL model) [59]. The mean value of the item difficulties is chosen as the zero point of the logit scale, which represents both item difficulties and personal abilities. The test quality is evaluated by WLE (weighted

likelihood estimates) and EAP/PV (expected a posteriori/plausible value) reliabilities [60] as well as by the weighted root mean square values (WMNSQ) within the limits of $0.77 < \text{WMNSQ} < 1.33$ [61]. Both IRT analyses of the data show acceptable reliability and fit values. The EAP/PV reliability is .617 (data from the first measuring time) and .746 (data from the second measuring time), respectively, whereas the WLE reliability is .572 and .711, respectively. The weighted mean squares are between 0.849 and 1.273. Personal abilities determined by the IRT analyses are included as dependent variables in further evaluation. The average ability values before and after training, for different conditions and both sexes, are shown in Table 1.

Table 1. Average person abilities in VMRT for different measurement times, conditions, and groups. The abilities are distributed on logit scale and can take values between -3 and +3.

	mean (M)	standard deviation (SD)
pre-test	-0.39	0.88
post-test	0.32	1.16
adaptive condition	-0.1	1.12
randomised condition	0.03	1.06
female	-0.28	1.05
male	0.22	1.07

A mixed ANOVA analysis is employed to test the hypotheses by considering several independent variables such as sex (female vs. male), measurement point (before or after training), and condition (adaptive vs. randomised). Subject ID is specified as a random factor. Sex, time of measurement, condition, and their interactions are included as fixed factors.

The 2 group \times 2 time \times 2 sex mixed ANOVA yielded a main effect of time ($F(1, 98) = 34.343, p < .001$) and a main effect of sex ($F(1, 98) = 9.873, p < .01$) but no main effect of condition ($F(1, 98) = 0.411, p = .41$). The condition \times time interaction is also significant ($F(1, 98) = 5.369, p < .05$), indicating that MRA improves more after training in the adaptive condition than it does in the randomised condition. Furthermore, the interactions sex \times time ($F(1, 98) = 5.458, p < .05$) and sex \times time \times condition ($F(1, 98) = 6.643, p < .05$) are also significant. Figure 3 illustrates these results. It becomes clear that the interactions sex \times time and sex \times time \times condition are significant because only men benefit from the adaptive condition. The possible reasons for this are going to be discussed later. In order to exclude the 3D gaming experience as a confounding factor in the effects shown, correlations between gaming experience and test performances before and after training are determined. The two correlation tests yielded non-significant

values ($r_1 = .08, p = .43$; $r_2 = .17, p = .08$). Furthermore, the inclusion of the variable 3D gaming experience in the mixed ANOVA did not lead to any significant main effects or interactions, which is why it is excluded from the analysis. Therefore, the 3D gaming experience is not relevant for the VMRT performance and can be neglected as a confounding variable.

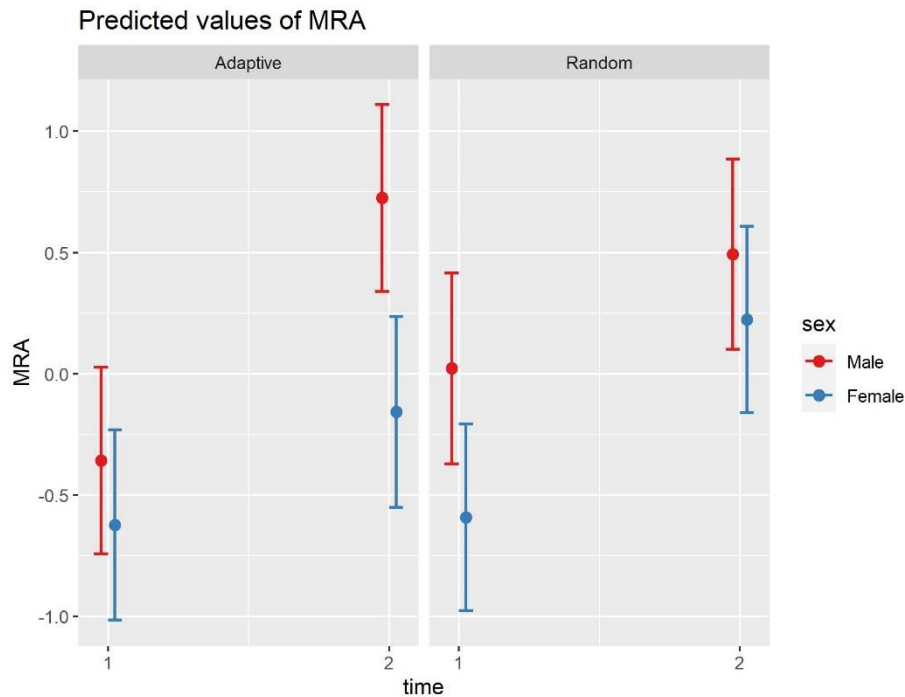


Fig. 3. Illustration of the results of the mixed ANOVA

In order to investigate whether the cognitive load in the adaptive condition is lower than it is the case in the randomised condition, the mean scale values for the relevant dimensions in the adaptive and randomised conditions are compared using a t-test. The results are shown in Table 2.

Table 2. Comparison of the NASA-TLX scale mean values in the adaptive and randomised conditions. Maximum possible scores on each scale were 20.

scale	mean value in the adaptive condition	mean value in the randomised condition	t-test results
mental demand	13.902	13.431	$t(100) = 1.651, p = .513$
temporal demand	10.706	10.863	$t(100) = -0.195, p = .845$
performance	10.235	11.392	$t(100) = -1.285, p = .202$
effort	11.255	11.118	$t(100) = 0.166, p = .869$
frustration level	9.196	9.843	$t(100) = -0.655, p = .514$

Next, the difference between men and women regarding their cognitive load is examined. In the dimensions mental demand ($t(100) = 1.988, p = .049$) and effort ($t(100) = 2.153, p$

= .034), the independent sample t-test shows a lower cognitive load for men than for women. An overview of the results in all dimensions is given in Table 3.

Table 3. Comparison of the NASA-TLX scale mean values for the male and the female test persons. Maximum possible scores on each scale were 20.

Scale	mean value for the female test persons	mean value for the male test persons	t-test results
mental demand	14.373	12.961	$t(100) = 1.988, p = .049$
temporal demand	11.373	10.196	$t(100) = 1.481, p = .142$
performance	11.510	10.118	$t(100) = 1.552, p = .124$
Effort	12.058	10.313	$t(100) = 2.153, p = .034$
frustration level	10.470	8.568	$t(100) = 1.958, p = .053$

To sum up, the results of the study partially confirm the hypotheses. It could be shown that (1) MRA improves after training, (2) the ability has improved greater in the adaptive condition than in the randomised condition (but only for men), and (3) men generally perform better in VMRT than women. Regarding the cognitive load, there are no differences when comparing the different conditions. The gender differences were found in some dimensions of NASA TLX. The results, as well as weaknesses of the study and further research prospects, are discussed in the next section.

5 Discussion

This experimental pretest-posttest study aimed to find an optimised VR-based training option for MRA. It investigated whether an adaptive environment is able to promote MRA better than a randomised one. The influence of gender and cognitive load during training was considered as well. In the first hypothesis, it was assumed that the training improves MRA, and that therefore, a higher MRA is measurable after the training than before the training. The mixed ANOVA confirmed this hypothesis by indicating that the main effect of time was significant. In addition to the main effect of time, mixed ANOVA also provided a significant main effect of sex, which suggests that men overall perform better in VMRT than women. The gender differences in MRA, which have been proven several times, seem to persist in virtual testing.

The second hypothesis differentiated between the adaptive and the randomised condition and postulated that MRA improvement is greater in the adaptive than in the randomised

condition. This hypothesis was also confirmed by the significant interaction condition \times time of the mixed ANOVA. However, the triple interaction condition \times time \times sex showed that the advantage in the adaptive condition is only valid for men. These unexpected results leave several unanswered questions. It is unclear why the adaptive condition might be more beneficial for the male subjects than the randomised condition but shows the opposite for the female participants. From the findings of previous research, the experience with 3D games could be used to explain the advantage of men in the successful use of virtual technology and better results in VMRT [62], [63]. However, investigation of the correlation between 3D gaming experience and VMRT performance yielded no significant results. In our study, this could be attributed to the large majority of subjects having no experience with 3D games (67 out of 102), making comparability with the rest of the sample problematic. Other factors that may influence VMRT performance could include motivation, technology acceptance, as well as flow or presence experience, which are identified as important factors related to virtual environments. A detailed investigation of this issue would also require a qualitative analysis of training data, which constitutes an interesting topic for future research and should not be ignored.

The third question of the study intended to investigate whether the group differences found by the mixed ANOVA are also reflected in the cognitive load measured by NASA TLX. To be specific, the advantage of the adaptive condition over the randomised condition and the advantage of men over women were to be examined. The t-tests for dependent samples could not detect any difference between the conditions. The gender comparison found a significantly lower effort and mental demand for men than women. The male participants seem to cope more easily with test and training tasks than the female, which can be explained by adducing the higher abilities of the men in mental rotation. However, this effect only proved to be significant in two dimensions of the NASA TLX. In contrast to this, the other three dimensions – temporal demand, performance, and frustration level – were not significant.

At this point, it should be mentioned that NASA TLX, as a subjective measuring method, must be viewed critically because the load can only be assessed retrospectively. For future studies, it would be interesting to include objective measurement methods in the investigation in addition to the subjective measurement methods of cognitive load. As an example, eye tracking or EEG examination could be well combined with the virtual environment (sources) and could provide valuable results regarding MRA.

In addition to NASA TLX, the adaptive training concept described above should be viewed critically as well. The goal was to optimise the virtual training programme by adaptivity, i.e., by tailoring the task difficulties to personal abilities. As mentioned at the beginning of the paper, adaptation can be constructed in many ways. The adaptation described here refers to the adaptation of the task difficulty depending on the solution behaviour of the respective test person. The difficulty of the tasks is exclusively determined by one characteristic, namely the number of cuboids. However, other characteristics could also influence the difficulty of the task. Earlier studies [26] could, for example, identify the rotation angle of the figures to the target figure as a difficulty-determining feature. Furthermore, the adaptive design of the learning environment can consider not only the task character but also individual characteristics of the users. Adapting the material to personal preferences, to motivation, and to the cognitive load of the user could be further steps in designing innovative learning and training environments.

As a follow-up question, the long-term effectiveness of the training seems to be relevant. It would be interesting to investigate whether training effects found with this study could also be measured after days, weeks, or even months. The organisation of the sample in such studies is complex, but it is a necessary prerequisite for the validation of the long-term impact of VR-based MRA training. Furthermore, it should also be questioned to what extent the virtual training of MRA influences the performance in technical areas, or to what extent the training effect can be generalised and applied to the other domains. Therefore, quasi-experimental studies which examine the training effects in the different MINT subjects would be helpful.

In the future, virtual mental rotation trainings could offer more adaptation possibilities and include more variables than just difficulty adjustments. In addition to mental rotation, personalised training could also be planned for the other dimensions of spatial abilities. One possibility is the personalised training of spatial orientation. This training would require a different environment than rotational training, since for the current study the environment was kept as simple as possible in order to avoid conflicting variables.

In summary, the results of the study partly confirm the expectations. The research question asking whether adaptively designed virtual training can improve MRA can be answered positively, but some questions – and one question in particular – remain: Why do men benefit more from the adaptive training condition than women? In order to investigate this, further studies with additional research objects would be necessary. However,

it can be assumed that adaptively designed virtual training environments have great potential for promoting mental rotation. The development and testing of such environments is still in its infancy and requires detailed further investigation.

References

- [1] J. Radianti, T. A. Majchrzak, J. Fromm, and I. Wohlgenannt, "Computers & Education A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education : Design elements , lessons learned , and research agenda," *Comput. Educ.*, vol. 147, no. July 2019, p. 103778, 2020, doi: 10.1016/j.compedu.2019.103778.
- [2] V. Potkonjak *et al.*, "Virtual laboratories for education in science, technology, and engineering: A review," *Comput. Educ.*, vol. 95, pp. 309–327, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.compedu.2016.02.002.
- [3] Ü. Çakiroğlu and S. Gökoğlu, "Development of fire safety behavioral skills via virtual reality," *Comput. Educ.*, vol. 133, pp. 56–68, May 2019, doi: 10.1016/j.compedu.2019.01.014.
- [4] N. Elmqaddem, "Augmented Reality and Virtual Reality in Education. Myth or Reality?," *Int. J. Emerg. Technol. Learn.*, vol. 14, no. 03, pp. 234–242, Feb. 2019, doi: 10.3991/ijet.v14i03.9289.
- [5] M. Sattar *et al.*, "Motivating Medical Students Using Virtual Reality Based Education," *Int. J. Emerg. Technol. Learn.*, vol. 15, no. 2, pp. 160–174, 2020.
- [6] C. Landsberg, "Tailoring Instruction To the Individual: Investigating the Utility of Trainee Aptitudes for Use in Adaptive Training," *Electron. Theses Diss.*, 2015, [Online]. Available: http://etd.fcla.edu/CF/CFE0005646/Landsberg_Dissertation_draft_Final.pdf.
- [7] D. F. Halpern and M. L. LaMay, "The Smarter Sex: A Critical Review of Sex Differences in Intelligence," *Educ. Psychol. Rev.*, vol. 12, no. 2, pp. 229–246, 2000, doi: 10.1023/A:1009027516424.
- [8] J. S. Monahan, M. A. Harke, and J. R. Shelley, "Computerizing the mental rotations test: Are gender differences maintained?," *Behav. Res. Methods*, vol. 40, no. 2, pp. 422–427, May 2008, doi: 10.3758/BRM.40.2.422.
- [9] D. Voyer, S. Voyer, and M. P. Bryden, "Magnitude of sex differences in spatial abilities: A meta-analysis and consideration of critical variables," *Psychol. Bull.*, vol. 117, no. 2, pp. 250–270, 1995, doi: 10.1037/0033-2909.117.2.250.
- [10] D. H. Uttal *et al.*, "The malleability of spatial skills: A meta-analysis of training studies.," *Psychol. Bull.*, vol. 139, no. 2, pp. 352–402, May 2013, doi: 10.1037/a0028446.
- [11] S. Ariali, "Training of mental rotation ability in virtual spaces," *J. Tech. Educ.*, vol. 8, no. 2, pp. 46–63, 2020.
- [12] L. Freina and M. Ott, "A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education: State Of The Art and Perspectives," 2015, [Online]. Available: <http://www.google.com/patents/US3050870>.
- [13] T. S. Mujber, T. Szecsi, and M. S. J. Hashmi, "Virtual reality applications in manufacturing process simulation," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 155–156, no. 1–3, pp. 1834–1838, Nov. 2004, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2004.04.401.
- [14] C. Dede, "Immersive interfaces for engagement and learning," *Science (80-.)*, vol. 323, no. 5910, pp. 66–69, Jan. 2009, doi: 10.1126/science.1167311.

- [15] S. Rogers, "Virtual Reality: The learning aid of the 21st century.," *Forbes*, 2019. <https://www.forbes.com/sites/solrogers/2019/03/15/virtual-reality-the-learning-aid-of-the-21st-century/#2e403c6a139b>.
- [16] M. Hoffmann, K. Schuster, D. Schilberg, and S. Jeschke, "Next-Generation Teaching and Learning Using the Virtual Theatre," in *At the Edge of the Rift*, BRILL, 2019, pp. 51–64.
- [17] A. Dünser, K. Steinbügl, H. Kaufmann, and J. Glück, "Virtual and augmented reality as spatial ability training tools," in *Proceedings of the 7th ACM SIGCHI New Zealand chapter's international conference on Computer-human interaction: design centered HCI*, Apr. 2006, pp. 125–132, doi: 10.1145/1152760.1152776.
- [18] C. Carbonell-Carrera and J. L. Saorin, "Virtual learning environments to enhance spatial orientation," *Eurasia J. Math. Sci. Technol. Educ.*, vol. 14, no. 3, pp. 709–719, Nov. 2018, doi: 10.12973/ejmste/79171.
- [19] J. Kotlarek, I. C. Lin, and K. L. Ma, "Improving spatial orientation in immersive environments," in *SUI 2018 - Proceedings of the Symposium on Spatial User Interaction*, Oct. 2018, pp. 79–88, doi: 10.1145/3267782.3267792.
- [20] A. E. Richardson, D. R. Montello, and M. Hegarty, "Spatial knowledge acquisition from maps and from navigation in real and virtual environments," *Mem. Cogn.*, vol. 27, no. 4, pp. 741–750, 1999, doi: 10.3758/BF03211566.
- [21] M. C. Linn and A. C. Petersen, "Emergence and Characterization of Sex Differences in Spatial Ability: A Meta-Analysis," *Child Dev.*, vol. 56, no. 6, pp. 1479–1498, Dec. 1985, doi: 10.2307/1130467.
- [22] M. Hegarty and D. A. Waller, "Individual Differences in Spatial Abilities," in *The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking*, P. Shah and A. Miyake, Eds. Cambridge University Press, 2005, pp. 121–170.
- [23] R. Colom, M. J. Contreras, J. Botella, and J. Santacreu, "Vehicles of spatial ability," *Pers. Individ. Dif.*, vol. 32, no. 5, pp. 903–912, Apr. 2002, doi: 10.1016/S0191-8869(01)00095-2.
- [24] L. L. Thurstone, *Primary mental abilities*. Chicago: University of Chicago Press, 1938.
- [25] J. B. Carroll, *Human Cognitive Abilities: A Survey of Factor-Analytic Studies*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [26] R. N. Shepard and J. Metzler, "Mental rotation of three-dimensional objects," *Science (80-.)*, vol. 171, no. 3972, pp. 701–703, Feb. 1971, doi: 10.1126/science.171.3972.701.
- [27] M. Peters, B. Laeng, K. Latham, M. Jackson, R. Zaiyouna, and C. Richardson, "A redrawn vanderberg and kuse mental rotations test - different versions and factors that affect performance," *Brain Cogn.*, vol. 28, no. 1, pp. 39–58, Jun. 1995, doi: 10.1006/brcg.1995.1032.
- [28] J. C. Castro-Alonso and D. H. Uttal, "Science Education and Visuospatial Processing," in *Visuospatial Processing for Education in Health and Natural Sciences*, J. C. Castro-Alonso, Ed. Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 53–79.
- [29] S. Sorby, B. Casey, N. Veurink, and A. Dulaney, "The role of spatial training in improving spatial and calculus performance in engineering students," *Learn. Individ. Differ.*, vol. 26, pp. 20–29, 2013, doi: 10.1016/j.lindif.2013.03.010.
- [30] S. A. Sorby and B. J. Baartmans, "A Course for the Development of 3-D Spatial Visualization Skills," *Eng. Des. Graph. J.*, vol. 60, no. 1, pp. 12–20, 1996, Accessed: Jul. 05, 2020. [Online]. Available: <https://eric.ed.gov/?id=EJ528391>.
- [31] N. L. Veurink and S. A. Sorby, "Longitudinal study of the impact of requiring

- training for students with initially weak spatial skills,” *Eur. J. Eng. Educ.*, vol. 44, no. 1–2, pp. 153–163, Mar. 2019, doi: 10.1080/03043797.2017.1390547.
- [32] K. S. Mix *et al.*, “Separate but correlated: The latent structure of space and mathematics across development,” *J. Exp. Psychol. Gen.*, vol. 145, no. 9, pp. 1206–1227, Sep. 2016, doi: 10.1037/xge0000182.
- [33] F. Sella, E. Sader, S. Lolliot, and R. Cohen Kadosh, “Basic and advanced numerical performances relate to mathematical expertise but are fully mediated by visuospatial skills,” *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.*, vol. 42, no. 9, pp. 1458–1472, Sep. 2016, doi: 10.1037/xlm0000249.
- [34] S. Ariali and B. Zinn, “Virtuelle Umgebungen zur Analyse der mentalen Rotationsfähigkeit,” *Band*, vol. 6, no. 4, pp. 7–29, Nov. 2018, Accessed: Jul. 03, 2020. [Online]. Available: <http://www.journal-of-technical-education.de>.
- [35] D. Kimura and E. Hampson, “Cognitive Pattern in Men and Women Is Influenced by Fluctuations in Sex Hormones,” *Curr. Dir. Psychol. Sci.*, vol. 3, no. 2, pp. 57–61, 1994, doi: 10.1111/1467-8721.ep10769964.
- [36] R. Lynn, “Sex differences in intelligence and brain size: A paradox resolved,” *Pers. Individ. Dif.*, vol. 17, no. 2, pp. 257–271, Aug. 1994, doi: 10.1016/0191-8869(94)90030-2.
- [37] M. B. Casey, “Gender, sex, and cognition: Considering the interrelationship between biological and environmental factors,” *Learn. Individ. Differ.*, vol. 8, no. 1, pp. 39–53, Jan. 1996, doi: 10.1016/S1041-6080(96)90006-0.
- [38] M. Kozhevnikov, L. R. Cheng, and M. Kozhevnikov, “Effect of Environment Immersivity on Encoding Strategies of Spatial Tasks,” *Procedia Manuf.*, vol. 3, pp. 5059–5066, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.519.
- [39] R. Seurinck, G. Vingerhoets, F. P. De Lange, and E. Achten, “Does egocentric mental rotation elicit sex differences?,” *Neuroimage*, vol. 23, no. 4, pp. 1440–1449, Dec. 2004, doi: 10.1016/j.neuroimage.2004.08.010.
- [40] D. M. Adams, A. T. Stull, and M. Hegarty, “Effects of Mental and Manual Rotation Training on Mental and Manual Rotation Performance,” *Spat. Cogn. Comput.*, vol. 14, no. 3, pp. 169–198, May 2014, doi: 10.1080/13875868.2014.913050.
- [41] G. Wiedenbauer, J. Schmid, and P. Jansen-Osmann, “Manual training of mental rotation,” *Eur. J. Cogn. Psychol.*, vol. 19, no. 1, pp. 17–36, Apr. 2007, doi: 10.1080/09541440600709906.
- [42] M. Omar *et al.*, “Effects of Mobile Augmented Reality (MAR) towards Students’ Visualization...,” *Int. J. Emerg. Technol. Learn.*, vol. 14, no. 20, pp. 106–119, Oct. 2019.
- [43] R. Wright, W. L. Thompson, G. Ganis, N. S. Newcombe, and S. M. Kosslyn, “Training generalized spatial skills,” *Psychon. Bull. Rev.*, vol. 15, no. 4, pp. 763–771, Aug. 2008, doi: 10.3758/PBR.15.4.763.
- [44] A. Wohlschläger and A. Wohlschläger, “Mental and manual rotation,” *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, vol. 24, no. 2, pp. 397–412, 1998, doi: 10.1037/0096-1523.24.2.397.
- [45] S. Oxman and W. Wong, “White Paper : Adaptive Learning Systems,” *Integr. Educ. Solut.*, 2014.
- [46] O. Park and J. Lee, “Adaptive instructional systems,” in *Handbook of research for educational communications and technology*, D. Jonassen, Ed. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates., 2003, pp. 651–685.
- [47] C. R. Landsberg, A. D. Mercado, W. L. Van Buskirk, M. Lineberry, and N. Steinhauser, “Evaluation of an adaptive training system for submarine periscope operations,” in *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*,

- 2012, pp. 2422–2426, doi: 10.1177/1071181312561493.
- [48] K. N. Bauer, R. C. Brusso, and K. A. Orvis, “Using Adaptive Difficulty to Optimize Videogame-Based Training Performance: The Moderating Role of Personality,” *Mil. Psychol.*, vol. 24, no. 2, pp. 148–165, Mar. 2012, doi: 10.1080/08995605.2012.672908.
- [49] G. Corbalan, L. Kester, and J. J. G. van Merriënboer, “Selecting learning tasks: Effects of adaptation and shared control on learning efficiency and task involvement,” *Contemp. Educ. Psychol.*, vol. 33, no. 4, pp. 733–756, Oct. 2008, doi: 10.1016/j.cedpsych.2008.02.003.
- [50] J. Sweller, J. J. G. van Merrienboer, and F. G. W. C. Paas, “Cognitive Architecture and Instructional Design,” *Educ. Psychol. Rev.*, vol. 10, no. 3, pp. 251–296, Jun. 1998, doi: 10.1023/A:1022193728205.
- [51] A. Baddeley, “Working memory,” *Science (80-.)*, vol. 255, no. 5044, pp. 556–559, 1992, doi: 10.1126/science.1736359.
- [52] J. Sweller, “CHAPTER TWO - Cognitive Load Theory,” in *Psychology of Learning and Motivation*, vol. 55, J. P. Mestre and B. H. Ross, Eds. Academic Press, 2011, pp. 37–76.
- [53] D. Charles *et al.*, “Player-Centred Game Design: Player Modelling and Adaptive Digital Games,” in *Proceedings of DiGRA 2005 Conference: Changing Views – Worlds in Play. Digital Games Research Association: DiGRA*, 2005, pp. 285–298.
- [54] N. Vaughan, B. Gabrys, and V. N. Dubey, “An overview of self-adaptive technologies within virtual reality training,” *Comput. Sci. Rev.*, vol. 22, pp. 65–87, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.cosrev.2016.09.001.
- [55] A. Ewais and O. Troyer, “Authoring Adaptive 3D Virtual Learning Environments,” in *Web Design and Development: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*, 2014, pp. 714–733, doi: 10.4018/ijvple.2014010101.
- [56] S. G. Hart and L. E. Staveland, “Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research,” in *Human Mental Workload*, P. A. Hancock and N. Meshkati, Eds. Amsterdam: North Holland Press, 1988.
- [57] A. Robitzsch, T. Kiefer, and M. Wu, “TAM: Test Analysis Modules.” 2020, [Online]. Available: <https://cran.r-project.org/package=TAM>.
- [58] J. Pinheiro, D. Bates, S. DebRoy, D. Sarkar, S. Heisterkamp, and B. Van Willigen, “Linear and Nonlinear Mixed Effects Models.” 2020, Accessed: Jul. 05, 2020. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/272475067_The_Nlme_Package_Linear_and_Nonlinear_Mixed_Effects_Models_R_Version_3.
- [59] G. Rasch, *Studies in mathematical psychology: I. Probabilistic models for some intelligence and attainment tests*. Oxford, England: Nielsen & Lydiche, 1960.
- [60] R. J. Adams, “Reliability as a measurement design effect,” *Stud. Educ. Eval.*, vol. 31, no. 2–3, pp. 162–172, Jun. 2005, doi: 10.1016/j.stueduc.2005.05.008.
- [61] T. G. Bond and C. M. Fox, *Applying the rasch model: Fundamental measurement in the human sciences: Second edition*. New York: Routledge Taylor & Francis Group, 2007.
- [62] M. Murcia-López and A. Steed, “The Effect of Environmental Features, Self-Avatar, and Immersion on Object Location Memory in Virtual Environments,” *Front. ICT*, vol. 3, pp. 1–10, Nov. 2016, doi: 10.3389/fict.2016.00024.
- [63] R. De Lisi and D. M. Cammarano, “Computer experience and gender differences in undergraduate mental rotation performance,” *Comput. Human Behav.*, vol. 12, no. 3, pp. 351–361, Sep. 1996, doi: 10.1016/0747-5632(96)00013-1.

3 Diskussion der Gesamtergebnisse und Schlussfolgerungen

Im folgenden Abschnitt werden nach der Zusammenfassung der Ergebnisse die einzelnen Forschungsfragen (FF1-FF10) der Arbeit beantwortet. Anschließend werden die im Kontext der durchgeführten Studien besonders relevanten Problemstellungen aufgegriffen und vor dem Hintergrund des Forschungsstandes diskutiert, um die Ergebnisse der durchgeführten empirischen Studien zu erörtern. In der Folge werden Grenzen der Untersuchungen aufgezeigt und aus den gewonnenen Erkenntnissen Empfehlungen abgeleitet. Der Abschnitt schließt mit einem Fazit und gibt einen kurzen Ausblick auf Forschungsdesiderata.

3.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die vorliegende Arbeit intendierte, den Einsatz von VR-Technologien zur Erfassung und Förderung räumlicher Fähigkeiten (Fähigkeitsfacette mentaler Rotationsfähigkeit) wissenschaftlich zu untersuchen. Die hierbei durchgeführten Analysen beziehen sich zum einen auf den Vergleich verschiedener technologischer Varianten und zum anderen auf die Trainingseffektivität sowie deren Einflussfaktoren. Zu diesem Zweck wurden drei aufeinander aufbauende Studien durchgeführt.

Im Fokus der ersten Studie steht die Erfassung der dreidimensionalen mentalen Rotationsfähigkeit in Abhängigkeit von drei Testvariationen, die mithilfe von verschiedenen virtuellen Umgebungen realisiert wurden. Dabei war zu klären, ob die Lösung von 3-D-MRT-Aufgaben in vollimmersiven Umgebungen im Vergleich zu nicht- oder teilimmersiven Umgebungen begünstigt wird und zu besseren Lösungsraten führt. Neben dem Vergleich der drei Bedingungen bezüglich der Testleistung wurde der Einfluss der Variablen Geschlecht, fluide Intelligenz (IQ) und Paper-Pencil-MRT-Leistung sowie deren Interaktionen mittels Regressionsanalyse untersucht. Durch die durchgeführten Analysen sollten folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- Hängen die im 3-D-MRT erzielten Testergebnisse vom Immersionsgrad der Technologie ab? (FF1)

- Gibt es einen Zusammenhang zwischen den im 3-D-MRT erzielten Testergebnissen und dem IQ der Lernenden? (FF2)
- Gibt es geschlechtsspezifische Unterschiede in virtuellen 3-D-Testumgebungen? (FF3)

Um die erste Frage (FF1) zu beantworten und die Testleistung unter den drei Bedingungen (nichtimmersiv, teilimmersiv und vollimmersiv) zu vergleichen, wurden zunächst nicht-parametrische Mann-Whitney U-Tests durchgeführt. Die Tests ergeben keine eindeutigen Ergebnisse. Entgegen der Annahme konnte nicht bestätigt werden, dass die Immersivität der zur Erfassung der mentalen Rotationsfähigkeit verwendeten Technologie die Testleistung (gemessen an der Anzahl der korrekt gelösten Aufgaben) beeinflusst: Es konnte keine Leistungsunterscheidung zwischen teil- und nichtimmersiven bzw. zwischen voll- und teilimmersiven Bedingungen gefunden werden. Die Situation stellt sich nach Durchführung der Regressionsanalyse unter Berücksichtigung der Variablen fluide Intelligenz, Geschlecht, intuitive Anwendbarkeit der Technologie und Paper-Pencil MRT Leistung anders dar. Die Haupteffekte der technologischen Variationen erweisen sich als teilweise signifikant: Während sich für die vollimmersive Bedingung kein signifikanter Haupteffekt herausstellt, ist die Leistung der Teilnehmenden in der teilimmersiven Bedingung signifikant besser als in der nichtimmersiven Bedingung. Somit kann die erste Forschungsfrage eingeschränkt bejaht werden.

Die Regressionsanalyse deckt einen hochsignifikanten Haupteffekt des IQ auf die Leistung im 3-D-MRT auf (FF2). Die Korrelationsanalyse zeigt ebenfalls signifikante Korrelationen zwischen IQ und Testleistung in den nichtimmersiven und teilimmersiven Bedingungen. In der vollimmersiven Bedingung erweist sich die Korrelation als nicht signifikant, was darauf hindeutet, dass vollimmersive Umgebungen vergleichbare Bedingungen für die Personen mit hohem und niedrigem IQ schaffen.

Die Berücksichtigung des Geschlechts macht deutlich, dass weibliche Probanden in der computergestützten nichtimmersiven 3-D Umgebung besser abschneiden als in immersiven Umgebungen – unabhängig von ihrem IQ – und sind im Durchschnitt mit männlichen Probanden vergleichbar. Allerdings sind sie sowohl im Paper-Pencil-MRT als auch in der vollimmersiven Umgebung den männlichen Probanden unterlegen (FF3). Diese für das weibliche Geschlecht ungünstige Wirksamkeit des hohen Immersionsgrades auf die Testleistung widerspricht den Erwartungen und führt zu einigen Diskussionspunkten, auf die im Abschnitt 3.1.1 näher eingegangen wird.

Die Ergebnisse der ersten Studie entsprechen damit zwar nicht den ursprünglichen Erwartungen, es können dennoch wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Ein wichtiges Ergebnis der Studie ist, dass geschlechtsspezifische Unterschiede in der gemessenen mentalen Rotationsfähigkeit in der nichtimmersiven und teilimmersiven Bedingung verschwinden, in der vollimmersiven Bedingung jedoch bestehen. Hiermit konnte die Annahme, dass sich die egozentrische Darstellung (wie sie in teilimmersiven und vollimmersiven Bedingungen gegeben ist) beim Lösen von räumlichen Aufgaben förderlich auf die Leistung auswirkt, nicht uneingeschränkt bestätigt werden. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass neben dem IQ und dem Geschlecht weitere persönliche Merkmale und neben der egozentrischen Darstellung auch andere Eigenschaften virtueller Umgebungen für die Leistung in mentale Rotationsfähigkeit in virtuellen Räumen entscheidend sind.

Studie 2 untersucht, ob und wie der interaktive Charakter von VR-Umgebungen zur Förderung der mentalen Rotation eingesetzt werden kann und liefert zeitgleich Erkenntnisse über das VR-basierte, adaptive Training der mentalen Rotationsfähigkeit. Dabei wurden folgende Forschungsfragen beantwortet:

- Wie wirkt sich die realitätsnahe Auseinandersetzung mit den dreidimensionalen Würfelfiguren auf die virtuelle MRT-Leistung aus? (FF4)
- Hängt die Schwierigkeit der virtuellen MRT-Aufgaben von der Komplexität der enthaltenen Figuren (Anzahl der Würfel) ab? (FF5)
- Wie hängt die mit dem Paper-Pencil-MRT gemessene Fähigkeit mit der mit dem virtuellen MRT gemessenen Fähigkeit zusammen? (FF6)

Zunächst war zu klären, ob das virtuelle Training, d. h. die interaktive Auseinandersetzung mit den dreidimensionalen Würfelfiguren, die mentale Rotationsfähigkeit verbessert (FF4). Zu diesem Zweck wurden die Lösungsraten der Paper-Pencil-MRT vor und nach der virtuellen Phase verglichen (within-subjects design). Die Ergebnisse zeigen eine signifikante Verbesserung dieser Fähigkeit nach der virtuellen Phase, was für die Wirksamkeit des VR-Trainings spricht.

Das zweite Ziel dieser Studie war es, ein schwierigkeitsbestimmendes Merkmal von virtuellen MRT-Figuren zu identifizieren, um dieses als adaptive Variable zu nutzen und so ein adaptives Trainingsdesign zu realisieren. Erwartungsgemäß erweist sich die Anzahl der Würfel einer Figur als ein schwierigkeitsbestimmendes Merkmal (FF5). Demnach sind virtuelle MRT-Aufgaben, bei denen die enthaltenen Figuren komplex sind, d. h. aus

mehr Würfeln bestehen, schwieriger als Aufgaben, bei denen die enthaltenen Figuren aus weniger Würfeln bestehen.

Drittens wurde in Studie 2 der Zusammenhang zwischen Paper-Pencil-MRT und virtueller MRT zur Validierung vom virtuellen MRT analysiert (FF6). Eine Unabhängigkeit dieser beiden Tests würde nahelegen, dass sie verschiedene Konstrukte messen und die mentale Rotationsfähigkeit nur mit dem Paper-Pencil-MRT gemessen werden könnte. Die Korrelationsanalyse zeigt eine hochsignifikante Korrelation. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die mentale Rotationsfähigkeit auch mit einem virtuellen MRT in einer VR-Umgebung valide ermittelt werden kann. Die Ergebnisse der Studie 2 bestätigen somit die Erwartungen und liefern anschlussfähige Ergebnisse für die Entwicklung eines VR-basierten mentalen Rotationstrainings (Studie 3).

Studie 3 baut auf Studie 1 und 2 auf und hat zum Ziel, eine optimierte VR-basierte Trainingsmöglichkeit für mentale Rotationsfähigkeiten zu entwickeln. Dazu wird die Frage geprüft, ob eine adaptive Umgebung die mentale Rotationsfähigkeit besser fördern kann als eine randomisierte Umgebung. Gleichzeitig wird der Einfluss des Geschlechts und der kognitiven Belastung während des Trainings untersucht. Dabei werden die folgenden Forschungsfragen bearbeitet:

- Ist die virtuelle MRT-Leistung nach dem Training höher als vor dem Training? (FF7)
- Wie effektiv ist adaptives VR-basiertes mentales Rotationstraining im Vergleich zu einer randomisierten Trainingsumgebung? (FF8)
- Unterscheiden sich Personen in der adaptiven Bedingung von Personen in der randomisierten Bedingung in Bezug auf die kognitive Belastung? (FF9)
- Gibt es geschlechtsspezifische Unterschiede in Bezug auf die virtuelle MRT-Leistung und/oder die kognitive Belastung? (FF10)

Die gemischte ANOVA bestätigt die Erwartung, dass das Training allgemein die mentale Rotationsfähigkeit verbessert und daher nach dem Training eine höhere mentale Rotationsfähigkeit durch virtuelle MRT messbar ist als vor dem Training (FF7). Neben dem Haupteffekt der Zeit besteht ein signifikanter Haupteffekt des Geschlechts. Die geschlechtsspezifischen Unterschiede in der mentalen Rotationsfähigkeit, die mehrfach nachgewiesen wurden, scheinen daher auch in virtuellen Tests zu bestehen.

Die Fragestellung, ob der Trainingseffekt in der adaptiven Bedingung größer ist als in der randomisierten Bedingung (FF8) wurde durch die signifikante Interaktion Bedingung \times Zeit der gemischten ANOVA positiv beantwortet. Die dreifache Interaktion Bedingung \times Zeit \times Geschlecht zeigt jedoch, dass der Vorteil in der adaptiven Bedingung nur für männliche Probanden gültig ist. Diese unerwarteten Ergebnisse lassen einige Fragen offen. Es ist zunächst unklar, warum die adaptive Bedingung für die männlichen Probanden vorteilhafter ist als für die weiblichen Probanden. Dies wird in Abschnitt 3.1.1 näher besprochen.

Die abschließenden Fragen der Studie 3 sollen dahingehend beantwortet werden, ob sich die bei der gemischten ANOVA gefundenen Gruppenunterschiede auch in der von der subjektiv gemessenen kognitiven Belastung widerspiegeln. Konkret sollte der Vorteil der adaptiven Bedingung gegenüber der randomisierten Bedingung (FF9) und der Vorteil von Männern gegenüber Frauen (FF10) untersucht werden. Die t-Tests für unabhängige Stichproben konnten keinen Unterschied zwischen den Bedingungen feststellen. Der Geschlechtervergleich ergab für Männer eine signifikant geringere Anstrengung und geistige Beanspruchung als für Frauen. Die Teilnehmer scheinen Test- und Trainingsaufgaben leichter zu bewältigen als die Teilnehmerinnen.

Somit können alle im Rahmen dieser Arbeit formulierten Forschungsfragen bis auf FF9 teilweise positiv (FF1-FF3 und FF8) oder positiv (FF4-FF7 und FF10) beantwortet werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass virtuelle Umgebungen grundsätzlich geeignet sind, mentale Rotationsfähigkeit zu messen und zu fördern, auch wenn diese Aussage differenzierter zu betrachten ist. So profitieren weibliche Personen nicht in gleichem Maße von vollimmersiven adaptiven Trainingsumgebungen wie männliche Personen. Die Ergebnisse bezüglich geschlechtsspezifischer Unterschiede bei der mentalen Rotation in virtuellen Räumen sowie einige andere Aspekte lassen weitere Fragen offen und bedürfen einer ausführlichen Diskussion im Kontext des aktuellen Forschungsstandes. Daher werden im Folgenden die einzelnen Aspekte näher betrachtet.

3.1.1 Einfluss des Geschlechts auf die mentale Rotationsfähigkeit in virtuellen Räumen

In diesem Abschnitt soll das Problem der geschlechtsspezifischen Unterschiede bei der mentalen Rotationsfähigkeit aufgegriffen und im Zusammenhang mit den in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnissen betrachtet werden. Wie in der Einleitung beschrieben, berichten die Studien, die geschlechtsspezifische Unterschiede in der mentalen Rotationsfähigkeit untersuchen, über den Vorteil von Männern mit einer großen Effektgröße (Cohen's $d > 1$). Auch in Studie 1 dieser Arbeit ist in den nichtimmersiven und vollimmersiven Bedingungen ein Vorteil der Männer im 3-D-MRT zu beobachten. In der teilimmersiven Bedingung ist jedoch kein signifikanter Geschlechtsunterschied vorhanden. Die Abwesenheit dieses Effekts könnte darauf zurückzuführen sein, dass die egozentrierte Betrachtung der Figuren den Abstraktionsaufwand sowohl für weibliche als auch für männliche Probanden reduziert und die 3-D-MRT-Aufgaben für beide Geschlechter leichter zu lösen macht. Dafür sprechen auch die besseren Gesamtergebnisse in der teilimmersiven Bedingung im Vergleich zur nichtimmersiven im 3-D-MRT. Die Tatsache, dass die Geschlechterunterschiede in der vollimmersiven Bedingung wieder auftauchen, könnte darauf zurückzuführen sein, dass die extrinsische (technologiebedingte) kognitive Belastung Ressourcen beansprucht und die für die MRT-Aufgabenlösung benötigten Kapazitäten reduziert, wodurch die Aufgaben schwerer zu lösen sind. In der vollimmersiven Bedingung könnte es zu einer höheren extrinsischen kognitiven Belastung kommen, weil die Aufmerksamkeit möglicherweise auf irrelevante Aspekte gelenkt wird. Dazu gehören zum einen 6DoF und zum anderen die über Kabel am PC angeschlossene Technik mit den dazugehörigen zwei Controllern. In den Studien 2 und 3 sind trotz der Abwesenheit von Controllern Geschlechterunterschiede in 3-D-MRT vorhanden, was die Notwendigkeit von an Frauen gerichteten technikeinführenden Unterstützungsmaßnahmen deutlich macht.

In Studie 3 wurde ein zusätzlicher geschlechtsspezifischer Effekt beobachtet, der darauf beruht, dass adaptives Training einen größeren Einfluss auf Männer als auf Frauen hat. Männer, die adaptiv trainiert wurden, verbessern sich auf einem höheren Niveau im Vergleich zur randomisierten Gruppe und Frauen aus der gleichen Gruppe, während Frauen aus der gleichen Gruppe vergleichbar mit Frauen aus der randomisierten Gruppe sind. Die Adaptivität der virtuellen Umgebung scheint den Teilnehmern mehr zugute zu kommen, als den Teilnehmerinnen. Als Begründung hierfür kann die insgesamt geringe räumliche Fähigkeit der weiblichen Probanden herangezogen werden, was dazu führen könnte,

dass sie nur selten den untersten Level des Trainings verlassen und somit kaum von der Adaptivität profitieren.

Das insgesamt schlechte Abschneiden des weiblichen Geschlechts beim mentalen Rotationstest in virtuelle Räume könnte mehrere Ursachen haben. Zum einen könnte es aus der geringen Selbstwirksamkeitseinschätzung der Frauen und zum anderen aus ihrer mangelnden Erfahrung im spielerischen Umgang mit immersiver VR-Technologie resultieren. Nach aktuellen Erkenntnissen gibt es bei deutschen Jugendlichen noch immer Geschlechterunterschiede bei digitalen Spielen (mpfs, 2018, 2020). Die Unterschiede betreffen sowohl die Häufigkeit als auch die Dauer und Art des Spielens. Bei der Analyse des Medienverhaltens der 12- bis 19-Jährigen stellte die JIM-Studie fest, dass 79 % der Jungen jede Woche digitale Spiele spielen, aber nur 56 % der Mädchen (mpfs, 2020). Zudem ist die Spieldauer bei Mädchen deutlich kürzer. Jungen spielen mehr als dreimal so lang wie ihre weiblichen Altersgenossen (mpfs, 2018). Geschlechtsspezifische Unterschiede zeigen sich auch im Spielverhalten der VR-basierten Spiele. Laut den Ergebnissen einer kürzlich durchgeführten Studie zeigen männliche Spieler einen höheren Spaßfaktor und eine höhere Bereitschaft, VR-Spiele erneut zu spielen, nachdem sie VR-Spiele gespielt hatten (Um, 2020). Studie 3 dieser Arbeit steht im Einklang mit diesen Ergebnissen, indem sie eine geringere kognitive Belastung für männliche Probanden als für weibliche Probanden während der Auseinandersetzung mit der VR-Technologie aufzeigt. Um dem entgegenzuwirken, könnten zukünftige computergestützte Förderprogramme darauf abzielen, für weibliche Teilnehmerinnen angepasste Vorbereitungseinheiten zur Nutzung von VR-Technologien einzuführen und ihnen so mehr Vertrauen in die Nutzung der virtuellen Technologie zu geben.

3.1.2 Adaptives Training

Ziel der dritten Studie und insgesamt eines der Hauptziele der Arbeit war die Optimierung des virtuellen Trainingsprogramms der mentalen Rotationsfähigkeit durch Adaptivität. Die Entwicklung einer solchen Umgebung diente der Effizienzsteigerung des Trainings. Nicht-adaptive Trainingsumgebungen bieten den in mentalen Rotationsfähigkeiten starken und schwachen Personen die gleichen Aufgaben, was zu einer Über- oder Unterforderung der Trainierenden führen kann. Darüber hinaus nimmt die Trainingszeit zu und die Motivation ab. Um diesen Problemen zu begegnen, gibt es verschiedene Möglichkeiten, das Trainingsmaterial zu personalisieren bzw. adaptiv zu gestalten. Wie bereits zu

Beginn der Dissertation erwähnt, bestehen adaptive Umgebungen aus drei grundlegenden Komponenten: (1) Leistungsmessung der Trainierenden bzw. des Trainierenden, (2) adaptive Variablen und (3) adaptive Logik (Zahabi & Razak, 2020).

In Studie 3 wurden die Lösungen der Trainingsaufgaben als Leistungsmessungen gesammelt. Eine Aufgabe galt als gelöst, wenn beide Figuren gefunden und in die gleiche Position wie die Zielfigur gebracht wurden. Die adaptive Variable war die Komplexität der Figur, d.h. die Anzahl der Würfel, aus denen die Figur zusammengesetzt war. Insgesamt konnte die adaptive Variable in Studie 3 vier verschiedene Ausprägungen annehmen. Hinsichtlich des Zeitpunkts der Anpassung wurde der Parametrisierungsansatz verwendet, indem die Erkenntnisse aus der vorherigen Studie als Grundlage für die Anpassung des Trainingsmaterials herangezogen wurden. Die zu Grunde liegende Logik besteht aus der Regel, dass, wenn die Aufgabe gelöst wird, ein schwierigeres oder gleich schweres Item präsentiert und umgekehrt, wenn sie nicht gelöst wird, ein leichteres oder gleich schweres Item präsentiert wird.

Das Ergebnis, dass der Trainingseffekt in der adaptiven Bedingung besser als in der randomisierten Bedingung ausfällt, zeigt, dass die Teilnehmenden trotz der relativ einfachen Form der Personalisierung von den leistungsadaptiven Aufgabenstellungen profitieren. Den Personen, deren mentale Rotationsfähigkeit von Anfang an niedrig war, wurden durch das System Aufgaben gestellt, deren 3-D-Figuren aus wenigen Würfelfiguren bestanden und entsprechend als einfach eingestuft sind. Es ist anzunehmen, dass im Verlauf des adaptiven Trainings mit der Fähigkeitssteigerung der Personen die Aufgaben schwieriger wurden. Um herauszufinden, ob die Schwierigkeit der Aufgaben während des Trainings tatsächlich zunahm, wurde aufbauend auf die Studie 3 eine nachträgliche Log-Daten-Analyse durchgeführt, die in Publikation 3 nicht berichtet wurde. Die Analyse der Log-Daten umfasste die Betrachtung der während des Trainings gestellten Aufgaben und deren Schwierigkeiten. Es wurde untersucht, ob in der adaptiven Bedingung die Aufgabenschwierigkeit in der zweiten Hälfte des Trainings signifikant höher war als in der ersten Hälfte des Trainings. In der randomisierten Bedingung sollte es keinen Unterschied zwischen den beiden Hälften des Trainings geben. Zur Klärung der Fragestellung wurden Mediane für die Aufgabenschwierigkeit an jeder einzelnen Aufgabenposition gebildet (da jede Trainingseinheit 20 Aufgaben enthielt, gab es insgesamt 20 Aufgabenpositionen) und diese für die erste und zweite Hälfte des Trainings mit dem Mann-Whitney U-Test verglichen. Die Ergebnisse bestätigen die ursprüngliche Annahme: Während es in der

randomisierten Bedingung logischerweise keinen Unterschied zwischen der Aufgabenschwierigkeit in der ersten und zweiten Hälfte gab ($U = 50, p = 1$), waren die Aufgaben in der zweiten Hälfte des adaptiven Trainings signifikant schwieriger als in der ersten Hälfte ($U = 23, p < .05, d = 1.03$).

Auch die Auswertung der NASA-TLX-Daten lieferte interessante Ergebnisse. Entgegen den Erwartungen konnte für keine der fünf Dimensionen ein Unterschied zwischen den adaptiven und randomisierten Bedingungen gefunden werden. Basierend auf der Cognitive Load-Theorie wäre anzunehmen gewesen, dass sich der Vorteil der adaptiven Bedingungen vor allem in der kognitiven Belastung äußert. Es wurde erwartet, dass die mentalen Anforderungen optimiert und die wahrgenommene Leistung höher sein würde, da unterstellt wurde, dass die Aufgaben an die Fähigkeiten der Person ausgerichtet sind. Offenbar konnte die kognitive Entlastung subjektiv nicht wahrgenommen werden. Es ist nicht klar, ob die subjektiven Messmethoden die Ursache dafür sind oder ob die Gründe selbst in der Trainingsumgebung liegen: Da die adaptive Variable nur vier Schwierigkeitswerte annehmen konnte, könnte die Menge der Personen, bei denen die Adaptivität tatsächlich zu einer kognitiven Entlastung führte, zu gering gewesen sein. Um dieses Problem zu beheben, könnte die adaptive Umgebung durch Optimierungsmaßnahmen in Bezug auf adaptive Variablen, adaptive Logik oder Leistungsmessungen erweitert werden.

Zahabi et al. (2019) geben auf der Grundlage einer umfassenden Literaturrecherche Empfehlungen für die Gestaltung eines adaptiven Trainings für komplexe Fahrfertigkeiten. Da sich die Literaturrecherche nicht nur auf Fahrsysteme erstreckte, konnten die Empfehlungen in modifizierter Form auch auf andere adaptive Trainingsszenarien angewendet werden. Basierend auf dieser Grundlage sollten zukünftige Entwicklungen des adaptiven Trainings auf die folgende fünf Aspekte ausgerichtet werden:

(1) Beim adaptiven Training müssen sowohl die kognitive Belastung als auch die mentale Erregung des Trainierenden optimiert werden. Basierend auf dem Modell von Yerkes-Dodson-Low und der CLT, die bereits in der Einleitung beschrieben wurden, gibt es einen Bereich der Erregung und kognitiven Belastung, der zu einer optimierten Leistung führt. Kognitive Belastung und Erregung können mit physiologischen Messungen wie Eye-Tracking oder Herzfrequenzmessung unter Verwendung intelligenter Uhren oder Sensoren überwacht werden, um während des Trainings Echtzeitinformationen über individuelle Erregungsniveaus zu erhalten. Diese physiologischen Reaktionen können dann mithilfe

von Algorithmen des maschinellen Lernens klassifiziert und als Grundlage für die Bereitstellung anpassbarer Trainingsszenarien und Feedback verwendet werden.

(2) Um eine optimale Passung zwischen den Personen und Aufgaben zu gewährleisten, sollten beim adaptiven Training beide Möglichkeiten, Parametrisierung und dynamische Anpassung, berücksichtigt werden. Informationen über das Profil des Trainierenden, wie z.B. Alter, Lernstil, Wissen und Erfahrung, Beruf usw., können als erste Anhaltspunkte für die Anpassung des Szenarios oder für ein Feedback vor dem Training (d.h. für die Parametrisierung) verwendet werden. Anschließend sollten während der Trainings Leistungsmessungen gesammelt und das Szenario oder das Feedback in Echtzeit angepasst werden. Darüber hinaus bietet eine Kombination von Leistungsmessungen (d.h. Profil und Niveau der bzw. des Trainierenden, Leistung, physiologische Messungen) eine ganzheitlichere Beurteilung der Präferenzen und Fähigkeiten der bzw. des Trainierenden im Vergleich zu parametrisierenden oder dynamischen Ansätzen im Einzelnen.

(3) Zur Realisierung der dynamischen Anpassungen sollten fortschrittliche Algorithmen, die auf maschinellem Lernen und künstlicher Intelligenz beruhen, als adaptive Logik eingesetzt werden. Dabei sollte der neue Algorithmus sowohl zusätzliche Messungen für den Lernenden (z.B. physiologische Sensoren) als auch fortgeschrittene Algorithmen wie künstliche neuronale Netze beinhalten. Dieser Bereich ist allerdings sehr neu und bedarf noch umfangreicher Forschung.

(4) Trotz der Erkenntnis, dass eine umfassende adaptive Variable das Training verbessern kann, wurde dies bisher bei der Gestaltung adaptiver Umgebungen vernachlässigt. Auf der Grundlage der Literaturrecherche von Zahabi et al. (2019) haben die meisten Studien lediglich die Schwierigkeit der Aufgaben variiert. Auch die adaptive Variable in Studie 3 dieser Arbeit konnte nur Schwierigkeitsmerkmale ändern. Für die zukünftigen adaptiven Trainingsumgebungen werden erweiterte adaptive Variablen empfohlen, die neben der Aufgabenschwierigkeit auch andere Merkmale variieren, wie z. B. die Umgebungsparameter.

(5) Bei der Gestaltung von adaptiven Umgebungen ist es wichtig, die interindividuellen Unterschiede zu berücksichtigen. Auf der Grundlage des individuellen Lernstils, der anhand der Profilinformatoren und vor dem Training erfasst werden kann (d.h. Parametrisierung), muss eine personalisierte Feedback-Modalität bereitgestellt werden. Darüber hinaus sollte die Häufigkeit des Feedbacks auf der Grundlage des Alters, Wissens und

der Erfahrung der Trainierenden angepasst werden, um Frustration und kognitive Überlastung während des Trainings zu vermeiden.

Angesichts der Ergebnisse der dritten Studie und den Empfehlungen von Zahabi et al. (2019) könnte in Zukunft ein erweitertes adaptives Training der mentalen Rotationsfähigkeit geplant werden, dessen Wirksamkeit durch subjektive und objektive Messmethoden zu erfassen wäre.

3.1.3 Wirkungsmechanismen des virtuellen Rotationstrainings

Wie in der Einleitung ausführlich erörtert, gehen viele Autorinnen und Autoren davon aus, dass sich virtuelle Realitäten gut für das Training räumlicher Fähigkeiten eignen. Auch die Ergebnisse der Studien 2 und 3 bestätigen diese Annahme und deuten darauf hin, dass das im Rahmen der Arbeit entwickelte virtuelle Training die mentale Rotationsfähigkeit grundsätzlich verbessern kann. Die Ergebnisse geben jedoch wenig Aufschluss darüber, was das Training in virtuellen Räumen auszeichnet und durch welche Mechanismen die Konfrontation mit virtuellen Lernmaterialien zu positiven Trainingseffekten führt. Daher ist an dieser Stelle eine Diskussion über die Wirkungsmechanismen des virtuellen Trainings angebracht.

Ein wichtiger Vorteil virtueller Umgebungen, der nach Ansicht einiger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auch für die Aufhebung geschlechtsspezifischer Unterschiede in der mentalen Rotationsfähigkeit verantwortlich ist, ist die egozentrische Darstellungsmöglichkeit. Die in der Arbeit verwendeten immersiven Umgebungen geben den Teilnehmerinnen und Teilnehmern die Möglichkeit, mentale Rotationsfiguren aus der „Ich“-Perspektive wahrzunehmen. Die Rotationsfiguren schweben gefühlt einige Meter entfernt in die Luft und gleichen realen Objekten. Nach eigenen Annahmen wird unterstellt, dass die egozentrische Darstellung der Figuren den Abstraktionsaufwand reduzieren sollte. Neben der egozentrischen Perspektive sorgt auch eine 3-D-Darstellung für einen niedrigen Abstraktionsgrad. Mithilfe dieser Option konnten die Testpersonen in den durchgeführten Studien räumliche Konzepte direkt in VR realisieren, anstatt sie anhand von 2-D-Informationen aus Papiausdrucken herauszufinden.

Ein weiterer trainingsfördernder Mechanismus könnte der Einsatz der Leap Motion-Technologie als Interaktionsmöglichkeit sein. Diese Technologie erlaubt die Verwendung von Handgesten, um virtuelle 3-D-Objekte zu steuern. Es wird angenommen, dass

die Verwendung von Gesten die Belastung des Arbeitsspeichers reduziert (Sepp et al., 2019) und die interne Berechnung räumlicher Transformationen verbessert (Chu & Kita, 2011). Diese Annahme basiert auf der Auffassung, dass kognitive Prozesse mit der Körperrotation assoziiert sind und die Aktivierung von motorischen Repräsentationen bewirken, die mit der tatsächlichen Rotation von Objekten assoziiert sind (Adams et al., 2014). Theoretische Grundlage dafür ist die „common process“ Hypothese von Wohlschläger und Wohlschläger (1998), die besagt, dass es einen gemeinsamen Prozess gibt, der sowohl die motorischen Befehle für die manuelle Objektrotation als auch die Veränderung der kognitiven Prozesse für die mentale Rotation steuert (Wohlschläger & Wohlschläger, 1998). Folglich sollte das Training durch manuelle Drehung der mentalen Rotationsfiguren, wenn auch nur virtuell, eine kognitive Entlastung während der mentalen Rotation bewirkt haben.

Eine Besonderheit beim Training mit manuellen Drehungen ist, dass während der manuellen Drehung immer ein unmittelbares visuelles Feedback vorhanden ist (Adams et al. 2014). In der zweiten und dritten Studie wurde das Feedback zusätzlich durch die Veränderung der Farbe der Figur bei korrekter Drehung gegeben. Dadurch konnten die Probandinnen und Probanden sicher sein, ob sie die Aufgabe richtig gelöst hatten oder nicht. VR-basierte Umgebungen erlauben die Realisierung vieler weiterer Feedback-Möglichkeiten, die in den durchgeführten Studien nicht berücksichtigt wurden. So wäre beispielsweise ein weiteres Feedback in Kombination mit zusätzlichen Funktionen wie Sound, Animation oder einer Messagebox denkbar.

Darüber hinaus sind, wie in der Einleitung beschrieben, vollimmersive Umgebungen mit der Möglichkeit von 6DoF ausgestattet, die es den Nutzerinnen und Nutzer erlaubt, sich frei im virtuellen Raum zu bewegen. In der vollimmersiven Bedingung der Studie 1 und in den Studien 2 und 3 erlaubte diese Option den Teilnehmerinnen und Teilnehmern um die Rotationsfiguren herumzugehen und/oder den Blickwinkel durch Kopfbewegungen zu verändern, was einer realistischen Betrachtung der Objekte ähnelt. Es ist jedoch unklar, ob die Möglichkeit von 6DoF das Lernen tatsächlich fördert oder ob sie unter bestimmten Umständen das Lernen sogar behindert, indem sie die extrinsische kognitive Belastung erhöht. Zu diesen Umständen könnte z. B. die Irrelevanz der Bewegungsfreiheit für die Aufgabe gehören. Bislang liegen keine signifikanten empirischen Erkenntnisse zu den lernfördernden Aspekten von 6DoF vor. Einige Autorinnen und Autoren

thematisieren jedoch bereits, dass generell der visuelle Input in VR eine extrinsische kognitive Belastung erzeugen und das Lernen behindern könnte (Albus et al., 2021; Baceviute et al., 2020; Makransky et al., 2020; Parong & Mayer, 2018).

Für eine grundlegende Untersuchung der Wirkungsmechanismen des virtuellen Rotationsstrainings ist die Durchführung weiterer Studien notwendig, die die in Kapitel 3.2 beschriebenen methodischen Einschränkungen berücksichtigen und ergänzende Analysen durchführen. Dabei ist die Einbeziehung psychophysiologischer Messverfahren und damit die Bestimmung kognitiver und emotionaler Zustände ein weiterer Schritt zu einer grundlegenden Analyse des Trainings.

3.1.4 Gegenüberstellung verschiedener MRT-Varianten

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Testvarianten zur Erfassung der MRA verwendet. In den Studien 1 und 2 wurde MRA mittels Paper-Pencil-MRT kontrolliert und wurde in Studie 3 basierend auf den Ergebnissen von Studie 2 durch virtuelle MRT ersetzt. Die Paper-Pencil-basierte MRT, die seit Jahrzehnten erfolgreich zur Messung der mentalen Rotationsfähigkeit eingesetzt wird, zeigt einen starken Geschlechtsunterschied in der MRA. Auch im Rahmen dieser Arbeit verwendete Paper-Pencil-basierte MRTs zeigen starke geschlechtsspezifische Unterschiede. Im Gegensatz dazu kann die in Studie 1 verwendete 3-D-MRT keine Unterschiede zwischen weiblichen und männlichen Probanden feststellen, mit Ausnahme der vollimmersiven Bedingung, bei der sich ein leichter Vorteil von Männern gegenüber Frauen zeigt. Die mit der virtuellen MRT aus den Studien 2 und 3 ermittelten Geschlechtsunterschiede sind ebenfalls schwach.

Die Bestätigung eines Geschlechtsunterschieds im Paper-Pencil MRT und das Fehlen eines Unterschieds im virtuellen MRT lassen vermuten, dass es entweder Unterschiede in der Herangehensweise von Männern und Frauen an verschiedene Aufgaben oder Unterschiede in den kognitiven Anforderungen der verschiedenen Testvarianten gibt. Die potenziellen Unterschiede in den kognitiven Anforderungen, die verschiedenen Testvarianten an die Probanden stellen, könnten auf mehrere Ursachen zurückzuführen sein. Im Sinne der CLT ist die Bearbeitung von Paper-Pencil-basierten Testaufgaben anspruchsvoller als am Computer dargestellte dreidimensionale Aufgaben und führt zu einer Erhöhung der kognitiven Belastung (Arbeitsspeicher), da sie die Erstellung von kognitiven 3-D-Repräsentationen aus 2-D-Zeichnungen erfordert. Es wird angenommen, dass dieser

Prozess den Geschlechtsunterschied in der gemessenen mentalen Rotationsfähigkeit verstärkt (Voyer et al., 1995). Das virtuelle MRT wiederum verleiht den Stimuli das Aussehen von echtem 3-D, wodurch der kognitive Prozess der Erstellung von 3-D-Darstellungen wegfällt. Dies wirft die Frage nach der Konstruktvalidität computergestützter Tests auf: Ist die durch virtuelle MRT gemessene mentale Rotationsfähigkeit die gleiche Fähigkeit, die mit Paper-Pencil MRT gemessen wird?

Parsons et al. (2004) stellte durch eine neuropsychologische Untersuchung fest, dass sich die mentale Rotation sowohl im Paper-Pencil MRT als auch im virtuellen MRT der motorischen Planung und Antizipation bedient. Der Hauptunterschied besteht darin, dass die Paper-Pencil MRT keine kortikalen und subkortikalen Mechanismen nutzt, die für die Ausführung der Bewegung verantwortlich sind. Motorische Gehirnareale werden jedoch sowohl für die Paper-Pencil MRT-Aufgabe als auch für die virtuelle Testvariante verwendet (Cohen et al., 1996). Infolgedessen scheint das Argument, dass die Paper-Pencil MRT interne mentale Aufgaben beinhaltet, während die virtuelle Version davon eine völlig andere externe Aufgabe ist, nicht stichhaltig zu sein (Parsons et al., 2004). Die Tatsache, dass Paper-Pencil MRT und virtuelles MRT ein und dasselbe Konstrukt messen, wurde auch in Studie 2 durch eine hohe Korrelation zwischen diesen beiden Tests ($r=.62$) bestätigt. Die Korrelation zwischen den beiden Testvarianten war in Studie 1 geringer ($r_{NI3D-MRT}=.44$, $r_{TI3D-MRT}=.48$, $r_{VI3D-MRT}=.35$), aber hoch signifikant. Die relativ niedrigen Korrelationswerte waren in diesem Fall möglicherweise darauf zurückzuführen, dass die verwendeten Aufgaben nicht auf dem Test von Peters et al. (1995) basierten, sondern das gleiche Format hatten, wie es ursprünglich von Shepard und Metzler (1971) verwendet wurde: Die Probanden wurden aufgefordert, jeweils zwei Figuren zu vergleichen und zu entscheiden, ob sie gleich sind oder nicht. Interessant war dennoch, dass die Korrelation zwischen Paper-Pencil MRT und virtuelles MRT in der vollimmersiven Bedingung des virtuellen MRT am niedrigsten ausfiel, was auf die höchste Entlastung des Arbeitsgedächtnisses hinweisen könnte. Dagegen spricht jedoch der Vergleich der 3-D-MRT-Leistung zwischen verschiedenen Bedingungen der Studie 1: Während sich die vollimmersive Bedingung nicht von der nichtimmersiven Bedingung unterschied, wurden in der teilimmersiven Bedingung höhere Testwerte erzielt als in der nichtimmersiven Bedingung. Der Grund für dieses unerwartete Ergebnis könnte die Inkompatibilität der 3-D-MRT für die vollimmersive Bedingung sein. Die Testaufgaben in dieser Bedingung waren die gleichen wie in den anderen beiden Bedingungen und nutzten kaum den Mehrwert der vollen Immersion. Es gab keine Möglichkeit, mit den Figuren auf natürliche Art und Weise zu

interagieren. Die Probanden konnten zwar um die Figuren herumgehen und sie aus anderen Perspektiven betrachten, aber angesichts der Anweisung, Antworten so schnell wie möglich zu registrieren, wurde diese Möglichkeit kaum genutzt. Der Vorteil der egozentrischen Betrachtung der 3-D-MRT-Figuren, der in den teilimmersiven und vollimmersiven Bedingungen gegeben war, könnte in der vollimmersiven Bedingung durch ablenkende Faktoren (Brille per Kabel mit dem PC verbunden, stehende Position) ausgeglichen worden sein.

Zur grundlegenden Untersuchung der Konstruktvalidität von virtuellen MRTs sowie zur Untersuchung der Ursachen für die teilweise unerwarteten Leistungsunterschiede in den verschiedenen Testvarianten sind weitere Studien notwendig, die subjektive und objektive Messmethoden kombinieren und sowohl Verhaltensdaten als auch neuropsychologische und psychophysiologische Daten einbeziehen.

3.2 Limitationen

Die im Rahmen der Promotion durchgeführten Studien unterliegen einigen Limitationen, die zum Verständnis sowohl des Ausmaßes als auch der daraus gezogenen Schlussfolgerungen hervorgehoben werden müssen. Eine eingehende Auseinandersetzung mit diesen Limitationen könnte helfen, die zukünftige Forschung zur VR-basierten adaptiven Förderung der mentalen Rotationsfähigkeit angemessener zu gestalten. Die Einschränkungen beziehen sich zum einen auf die inhaltlichen bzw. konzeptuellen Aspekte bezüglich mentaler Rotationsfähigkeit und virtueller Realität und zum anderen auf die in den Studien gewählten methodischen Ansätze.

Die Behauptung, dass die MRT nach Peters et al. (1995) tatsächlich Geschlechtsunterschiede in den räumlichen Fähigkeiten feststellt, wurde mehrfach kritisiert. Zum einen wurde kritisiert, dass die geschlechtsspezifischen Unterschiede in der MRT vorwiegend unter dem Zeitlimit festgestellt werden, was darauf hindeutet, dass Frauen nicht unbedingt räumlich benachteiligt sind, sondern möglicherweise langsamer, jedoch gewissenhafter arbeiten. Es ist auch möglich, dass das Vorhandensein von Zeitdruck bei Frauen mehr Stress verursacht als bei Männern und dies das Arbeitsgedächtnis von Frauen beeinträchtigt, was sich wiederum auf die MRT-Leistung auswirken kann (Voyer, 2011). Des Weiteren erfordert MRT immer zwei Antworten und den Teilnehmenden wird abgeraten, zu raten. Es besteht die Möglichkeit, dass Frauen und Männer unter limitierten

zeitlichen Beschränkungen einen anderen Aspekt der Anweisungen hervorheben. Voyer et al. (2004) vermuten, dass Männer dazu neigen, die beiden Antworten zu markieren, während Frauen mehr Wert darauf legen, nicht zu raten, mit dem Endergebnis, dass Männer insgesamt mehr Antworten richtig markieren, als Frauen (Voyer et al., 2004).

Die konzeptuellen Einschränkungen betreffen auch die im Rahmen der Promotion entwickelten und verwendeten virtuellen mentalen Rotationstests. Die Testaufgaben aus Studie 1 basieren auf den Originalaufgaben von Shepard und Metzler (1971) und haben zwei Antwortmöglichkeiten mit dem Risiko, dass die Personen nach dem Zufallsprinzip die richtige Antwort wählen würden. Infolgedessen leidet der Test aufgrund einer hohen Ratenwahrscheinlichkeit unter einer Verringerung der Diskrimination. Das virtuelle MRT, das in Studie 2 auf der Grundlage der Testaufgaben von Peters et al. (1995) entwickelt und in Studie 3 zur Beurteilung der durch Training herbeigeführten Verbesserung verwendet wurde, litt ebenfalls unter Einschränkungen. Obwohl signifikante Korrelationen zwischen Paper-Pencil-MRT und virtuellem MRT gezeigt worden waren, ist es immer noch fraglich, ob diese Korrelation ($r=.62$) ausreichend ist, um die Validität des Tests zu gewährleisten. Der Test bestand aus 16 Items mit unterschiedlichen Schwierigkeitsgraden, die die persönlichen Fähigkeiten vor und nach dem Training kontrollierten. Für eine genauere Bestimmung der persönlichen Fähigkeiten wären mehr Items, insbesondere im oberen Schwierigkeitsbereich, erwünscht.

Eine weitere Einschränkung des virtuellen mentalen Rotationstests ist die Vernachlässigung der Winkelunterschiede zwischen den dreidimensionalen Rotationsfiguren innerhalb eines Items. Die Winkelabweichung zwischen den Figuren im virtuellen MRT sowie in den MRT-Versionen von Peters et al. (1995) wird nicht explizit manipuliert oder kontrolliert. Angesichts der Tatsache, dass mit zunehmender Winkeldisparität zwischen zwei Stimuli auch die Reaktionszeit in einer „identisch vs. gespiegelt“-Entscheidungsaufgabe zunimmt (Shepard & Metzler, 1971), kann die Kontrolle der Winkelabweichung von entscheidender Bedeutung sein. Zukünftige Arbeiten, die sich mit der VR-basierten Förderung der mentalen Rotationsfähigkeit befassen, sollten neben der Komplexität der Rotationsfiguren auch die Winkelabweichungen zwischen den Figuren als einen weiteren schwierigkeitsbestimmenden Faktor mit berücksichtigen.

Um zukünftige Forschung zu optimieren, sollte nicht außer Acht gelassen werden, dass die hier durchgeführten Studien nur einen Bruchteil der Interaktionen nutzten, die virtuelle Räume erlauben. Z.B. ist die Feedback-Technik (bei der nach jeder Antwort eine

Nachricht empfangen wird, um die Richtigkeit der Antwort anzuzeigen) eine effiziente methodische Strategie, die die spätere Durchführung der mentalen Rotation beeinflusst, indem sie die Anzahl der Fehler und die Antwortzeit reduziert (z. B. Kass et al., 1998; Kyllonen et al., 1984). In der zweiten und dritten Studie wurde die Rückmeldung durch die Veränderung der Farbe der Figur bei korrekter Rotation gegeben. Dadurch konnten die Probanden sicher sein, ob sie die Aufgabe richtig gelöst hatten oder nicht. Dennoch könnte sich ein weiteres Feedback in Kombination mit zusätzlichen Funktionen wie Ton, Animation oder Messagebox positiv auf die Motivation der Trainierenden auswirken und zu einer Verbesserung der Trainingsergebnisse beitragen.

Die durchgeführten Studien unterliegen auch methodischen Einschränkungen, deren Berücksichtigung für zukünftige Studien die Qualität der Forschung verbessern könnte. Eine wichtige methodische Limitation in Studie 2 ist, dass keine Kontrollgruppe verwendet wurde, um sicherzustellen, dass die Verbesserung im Paper-Pencil-MRT tatsächlich auf das Training zurückzuführen ist. Das Fehlen einer Kontrollgruppe ist aufgrund der Schwierigkeit, zwischen Test-Retest und Trainingseffekt zu unterscheiden, eine wichtige Einschränkung in Trainingsstudien (Uttal et al., 2013a). Diese Limitation wird in Studie 3 durch die Einbeziehung einer Vergleichsgruppe überwunden, die nicht adaptiv, sondern randomisiert trainiert wurde. Auch hier wäre jedoch eine zusätzliche Gruppe ganz ohne Training empfehlenswert gewesen: Da für Vor- und Nachtestung die gleiche Version des virtuellen Rotationstests verwendet wurde, könnte der gezeigte Effekt auf die wiederholten Tests zurückzuführen sein. Daher wäre es sinnvoll, mindestens eine Kontrollgruppe zu haben, um den Trainingseffekt getrennt von der Testwiederholung zu zeigen.

Eine weitere Einschränkung der Studie 3 ist, dass sie keine allgemeinen kognitiven Kontrollmaßnahmen des Arbeitsgedächtnisses oder der fluiden Intelligenz berücksichtigte, um sicherzustellen, dass es keine generellen Unterschiede zwischen den Experimental- und Kontrollgruppen gibt. Es ist jedoch wichtig zu betonen, dass beide Gruppen nach dem Zufallsprinzip ausgewählt wurden und vor der Trainingsphase keine Unterschiede in der mentalen Rotationsfähigkeit zwischen ihnen gefunden wurden. Daher ist es angemessen, anzunehmen, dass die fluide Intelligenz in beiden Gruppen vergleichbar ist.

In Studie 3 wurde Nasa-TLX zur Kontrolle von mentaler Belastung eingesetzt. Dieser Test basiert auf der subjektiven Wahrnehmung als Post-Task-Messung. Die Probanden müssen sich retrospektiv an die mentale Belastung während des Trainings erinnern und

ihre subjektive Bewertung dazu abgeben. Aufgrund der Überlagerung der bewertungsrelevanten Inhalte durch andere Informationen können solche retrospektiven Messungen zu Verzerrungen der Belastungsbeurteilung führen. Obwohl Nasa-TLX in Studie 3 wichtige geschlechtsspezifische Unterschiede zeigte, wäre es ratsam, in zukünftigen Studien Methoden zu verwenden, die tatsächlichen Echtzeit-Veränderungen der psychischen Belastung während des Trainings berücksichtigen können, wie z.B. psychophysiologische Messungen.

Die Studien 2 und 3 zeigen die Wirksamkeit des virtuellen Rotationstrainings, geben aber keine Auskunft darüber, durch welche Einzelmaßnahmen der Trainingseffekt hervorgerufen wird. Neben der Möglichkeit, die dreidimensionalen Figuren mit den Händen zu drehen, könnte auch eine bloße Betrachtung dieser Figuren einen Effekt haben, insbesondere im Hinblick auf Gedächtnisvorgänge. Möglicherweise könnte ein, der mentalen Rotation ähnlicher, Prozess zur Effektivität des Trainings beitragen. Daher wäre es von großer Bedeutung, die kritischen Komponenten des Trainings und ihren Einfluss auf die Wirksamkeit in weiteren Studien zu untersuchen. Dies könnte durch den Vergleich verschiedener Trainingsgruppen wie einer mentalen Rotations-, einer Visualisierungs- und einer motorischen Trainingsgruppe geschehen, was zusätzliche Informationen über die unterschiedliche Wirksamkeit spezifischer Trainingsmaßnahmen liefern würde.

Als problematisch sollten auch zu kurze Test- und Trainingszeiten erachtet werden. Eine Experimentalsitzung in den Studien 2 und 3 dauerte insgesamt eine Stunde und umfasste die Trainingseinheit sowie Prä- und Posttests. Um einen hohen Wirkungsgrad zu erzielen, wären längere Trainingssitzungen erstrebenswert. Außerdem wären Tests mit mehr Aufgaben zu empfehlen, um das gesamte Fähigkeitsspektrum erfassen zu können.

Die langfristige Wirksamkeit des Trainings steht unter einem Fragezeichen, da die Studie keine Follow-up-Session beinhaltet. Es ist nichts über die Stabilität der Trainingseffekte bekannt. Es wäre interessant zu untersuchen, ob die mit dieser Studie gefundenen Trainingseffekte auch nach Tagen, Wochen oder sogar Monaten gemessen werden könnten. Die Organisation der Stichprobe in längsschnittlich angelegten Studien ist komplex und mit viel Aufwand verbunden, aber eine notwendige Voraussetzung für die Validierung der Langzeitwirkung von VR-basiertem Training der mentalen Rotationsfähigkeit. Die im Rahmen von Studie 3 dieser Arbeit geplante Längsschnittuntersuchung zur Beobachtung von MRA Wochen und Monate nach dem Training in Schulen musste aufgrund von

Corona-Beschränkungen abgesagt werden. Daher bleibt die Frage nach der langfristigen Wirksamkeit des Trainings offen.

Zusätzlich sollte in zukünftigen Studien auch die Frage gestellt werden, inwieweit das virtuelle Training der mentalen Rotationsfähigkeit generalisierbar ist. Pani et al. (2005) argumentierten, dass das Erlernen der mentalen Rotation von Objekten durch die Anhäufung von Erinnerungen an spezifische Wahrnehmungserfahrungen und Schemata gekennzeichnet ist, die eine begrenzte Verallgemeinerung auf ähnliche Situationen, aber keine allgemeine Übertragbarkeit zeigen. In zukünftigen Studien sollte untersucht werden, ob die beobachteten Verbesserungen der mentalen Rotationsfähigkeit auf weniger ähnliche Objekte übertragen werden können oder ob Trainingseffekte stimulusspezifisch sind.

Ein weiterer Schwachpunkt der Studien ist die Zusammensetzung der Stichproben. An den Experimenten nahmen sowohl Schüler als auch Studenten und Berufstätige teil, die einen technischen oder nicht-technischen Hintergrund hatten. Die Heterogenität der Stichprobe macht es schwierig, die Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Studien zu gewährleisten. Darüber hinaus war das Alter der Teilnehmenden an den durchgeführten Studien im Allgemeinen sehr niedrig, da es sich bei den meisten Probandinnen und Probanden um Schülerinnen und Schüler oder Studierenden handelte. Diese Tatsache kann eine sehr wichtige Einschränkung für die Verallgemeinerbarkeit der berichteten Ergebnisse sein, da ältere Teilnehmerinnen und Teilnehmer möglicherweise einen anderen Umgang mit innovativer Technologie haben als jüngere.

Aus den Ergebnissen und Limitationen der durchgeführten Studien und den hier dargestellten Limitationen ergeben sich Empfehlungen und Desiderata für zukünftige Studien, die in den folgenden Unterabschnitten thematisiert werden.

3.3 Schlussfolgerungen

Die nachfolgend aufgeführten Empfehlungen leiten sich aus den Ergebnissen der Arbeit ab und beziehen sich zum einen auf die Einsatzbedingungen und zum anderen auf die Gestaltungsmöglichkeiten des virtuellen Trainings der mentalen Rotationsfähigkeit.

Generell besteht ein großes Interesse an der Möglichkeit, räumliches Denken zu fördern, da es Hinweise auf die Bedeutung räumlicher Fähigkeiten in den MINT-Disziplinen gibt (Città et al., 2019; Stieff et al., 2018; Uttal & Cohen, 2012; Verdine et al., 2017; Wai et al.,

2009). Diese Arbeit liefert eine Wirksamkeitsevidenz für räumliches Training, indem sie darauf hindeutet, dass die Fähigkeit, sich mentale Rotationen vorzustellen, durch die Durchführung realistischer manueller Rotationen von 3-D-Figuren in VR verbessert werden kann. Dies kann wichtige Implikationen für die Durchführung verschiedener Kompetenztrainings, insbesondere im technischen Bildungsbereich, haben, die durch eine Generalisierung der hier berichteten Erkenntnisse denkbar wären.

Die Förderung der räumlichen Fähigkeiten könnte ihre volle Wirkung entfalten, wenn alle entsprechenden Dimensionen berücksichtigt würden. Obwohl sich die hier berichteten Studien nur auf einen Aspekt der räumlichen Fähigkeiten konzentrieren (d.h. mentale Rotation), sind andere Aspekte genauso wichtig (z.B. räumliche Beziehungen, räumliche Orientierung). Daher ist die Förderung dieser Dimensionsaspekte ebenso erstrebenswert.

Die Anwendungsfälle für den Einsatz von VR-basiertem räumlichen Fähigkeitstraining erstrecken sich über verschiedene Ebenen von Bildungseinrichtungen und sind mit vielfältigen Vorteilen verbunden: Der Einsatz von VR-basierten Trainings räumlicher Fähigkeiten in den vorbereitenden Kursen für die naturwissenschaftlichen und technischen Berufe könnte sich positiv auf die spätere Leistung auswirken und gleichzeitig vorhandene geschlechtsspezifische Unterschiede minimieren. Auch die Integration solcher Trainings in die Lehrerbildung erscheint wünschenswert. Dies würde einerseits ein substanzielles Verständnis von räumlichen Fähigkeiten bei den Lehrpersonen schaffen und andererseits ihnen ein Werkzeug für innovative Fördermöglichkeiten an die Hand geben.

Die Einführung einer neuen Technologie für Bildungszwecke geht immer mit einer notwendigen Akzeptanz der Anwenderinnen und der Anwender einher. Eine hohe Akzeptanz und eine Steigerung der Motivation kann u. a. durch ein geeignetes Trainingsdesign erreicht werden. Insbesondere die Anpassung des Trainingsmaterials an die Bedürfnisse des Trainierenden wird in Forschung und Praxis immer wieder positiv bewertet. So können adaptiv gestaltete Trainingsumgebungen verschiedene Personengruppen mit unterschiedlichen Präferenzen und Stärken ansprechen.

Die Ergebnisse der dritten Studie zeigen eine geschlechtsspezifische Präferenz für VR-Technologie und insbesondere für adaptives Design. In zukünftigen virtuellen Trainingsumgebungen könnte dies ein wichtiger Hinweis für die Anpassung des Trainings an die jeweilige Zielgruppe sein. Um die Akzeptanz zu erhöhen, sollten den Nutzerinnen und Nutzern in Zukunft mehr Möglichkeiten gegeben werden, sich vor dem Training mit virtuellen

Technologien auseinanderzusetzen, damit das Gefühl der Vertrautheit erhöht und die kognitive Belastung bzw. Unsicherheit reduziert wird. Zum anderen könnten den Benutzern weitere Funktionen zur Verfügung gestellt werden, um die Attraktivität der VR-Umgebung und die Akzeptanz zu erhöhen.

Bei der Gestaltung von VR-basierten Lerninhalten, insbesondere solchen, die Interaktion erfordern, sollte generell darauf geachtet werden, möglichst viele natürliche Benutzerschnittstellen sinnvoll zu integrieren. Dies bedeutet jedoch nicht, dass sämtliche Benutzerschnittstellen einen natürlichen Charakter haben müssen. Vielmehr ist es wichtig, dass ein Gleichgewicht zwischen dem Entwicklungsaufwand und dem Nutzen der Software besteht. Der Einsatz vollimmersiver Umgebungen wird aufgrund des technologischen Aufwands nur für nachweisbare Vorteile empfohlen. Sind die Vorteile vergleichbar, können nichtimmersiver oder teilimmersiver Umgebungen herangezogen werden. Eine relativ einfache Möglichkeit, teilimmersiver Umgebungen zu realisieren, ist die Verwendung von 360°-Videoaufnahmen. Ihre möglichen Anwendungen und Vorteile erfordern jedoch weitere Erforschung.

Mit den oben genannten Maßnahmen können Disparitäten in der Bildung adressiert werden. VR-basierte Interventionen sollten insbesondere versuchen, Geschlechtsunterschiede zu beseitigen und damit Chancengleichheit bei der Nutzung von Lernangeboten zu gewährleisten. Die vielfältigen Möglichkeiten innovativer Technologien können zudem genutzt werden, um Lernumgebungen zu personalisieren, so dass eine Über- oder Unterforderung der Lernenden weitestgehend vermieden werden kann.

3.4 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei der Erfassung der mentalen Rotationsfähigkeit vollimmersive virtuelle Umgebungen im Vergleich zu teil- oder nichtimmersiven Umgebungen, absolut betrachtet, zu keinen höheren Lösungsraten führen, für die Realisierung bestimmter Fördermaßnahmen jedoch besser geeignet sind. So kann z.B. die Integration von natürlichen Benutzerschnittstellen die Auseinandersetzung mit Rotationsfiguren unterstützen. Dank ihres multifunktionalen Charakters können virtuelle Umgebungen zum einen Paper-Pencil-Tests ersetzen und zum anderen interaktive und personalisierte Trainings realisieren. Mit der Möglichkeit eines adaptiven Designs erhöhen solche Trainings zusätzlich die Effizienz und Effektivität. Bei der Gestaltung eines adaptiven

Trainings sollten neben verschiedenen leistungsbezogenen Aspekten (Testergebnisse, Trainingserfolg, Trainingsdauer etc.) auch personenbezogene Aspekte (Geschlecht, Alter, Motivation) nicht außer Acht gelassen werden. Auf diese Weise konzipierte Trainings könnten die mentale Rotationsfähigkeit benachteiligter Personengruppen verbessern, was nach dem derzeitigen Stand der Forschung eine Voraussetzung für den Erfolg in den MINT-Fächern darstellt. Ferner könnte die Förderung der mentalen Rotationsfähigkeit das Verständnis und das Vertrauen in die verschiedenen technischen Fächer erhöhen und damit Personengruppen ansprechen, die bisher in diesen Bereichen nur in unzureichendem Maße vertreten waren. Inwieweit das Training der mentalen Rotationsfähigkeit tatsächlich einen einschneidenden Einfluss auf den Erfolg in den technischen Berufsfeldern haben kann, ist noch nicht ausreichend geklärt. Um diese Frage eindeutig beantworten zu können, bedarf es weiterer Untersuchungen. Wünschenswert wäre eine Langzeitstudie, um die Generalisierbarkeit und langfristige Wirksamkeit der verschiedenen Untersuchungskonzepte sicherzustellen. Die Prüfung der Generalisierbarkeit der Effekte erfordert eine Vielzahl von Untersuchungen in unterschiedlichen Kontexten, ist aber eine wichtige Voraussetzung für die grundlegende Erforschung innovativer Lehr- und Lernumgebungen.

Die Fragen, die weiterer empirischer Forschung bedürfen, ergeben sich aus den Optimierungsproblemen virtueller adaptiver Trainingsumgebungen. Die hier diskutierten Gestaltungsmöglichkeiten virtueller Räume verbinden Ansätze aus den Bereichen Design, Ergonomie, Informatik, Medien, Pädagogik und Psychologie und konfrontieren uns mit Problemen aus neuen Kombinationen dieser Bereiche. Dabei entstehen vielfältige Forschungsdesiderata auf der Mikro-, Meso- und Makroebene der VR-Forschung. Da die hier vorgestellten Studien auf der Mikroebene angesiedelt sind, bleibt der folgende Forschungsausblick auf dieser Ebene.

Eine wichtige Forschungsperspektive ergibt sich aus den im virtuellen Raum beanspruchten Wahrnehmungsmodalitäten. In den durchgeführten Studien waren die Probanden ausschließlich auf ihre visuelle Wahrnehmung angewiesen. Allerdings ermöglicht VR nicht nur visuelle Eindrücke, sondern könnte weitere menschliche Sinne ansprechen und dadurch das Immersionsgefühl steigern. Der Mensch verfügt über fünf Sinnesmodalitäten, um mit der physischen Welt zu interagieren, darunter Hören und Tasten. Die genannten Modalitäten könnten in die virtuelle Realität integriert werden, um die visuelle Wahrnehmung zu ergänzen. Akustisches Feedback könnte beispielsweise die Augen des Be-

nutzers entlasten und hätte gleichzeitig den Vorteil, dass es parallel zu den visuellen Informationen verarbeitet werden könnte. Haptisches Feedback ist eine weitere leicht realisierbare sensorische Modalität bei VR-Interaktionen. Haptik bedeutet sowohl Kraft-Feedback (Simulation von Objekthärte, Gewicht und Trägheit) als auch taktilen Feedback (Simulation von Oberflächenkontaktgeometrie, Glätte, Schlupf und Temperatur). Die Bereitstellung haptischer Sensoren erfordert spezielle tragbare Hardware, deren Einsatz heutzutage die Usability der Technologie einschränkt und daher selten verwendet wird. Zukünftige Studien sollten sich mehr auf die Integration und Untersuchung solcher Schnittstellen konzentrieren. Dies gilt insbesondere für solche Handlungen, die manuelle Interventionen erfordern.

Die möglichen Kombinationen von VR-Technologie mit den neuesten Entwicklungen in den Bereichen Learning Analytics und Künstliche Intelligenz werfen neue Forschungsaspekte auf. Die Analyse von lernrelevanten Verhaltensdaten in VR könnte dabei helfen, die Lernprozesse besser zu verstehen und künstliche Intelligenz könnte zur Optimierung und Personalisierung der Lernumgebungen beitragen. Darüber hinaus bietet die Integration von Sensoren wie Eye Tracking, EDA (Elektrodermale Aktivität) oder EEG (Elektroenzephalographie) in die virtuellen Umgebungen die Möglichkeit, zusätzliche Daten zu sammeln, aus den Daten lernrelevante Erkenntnisse zu extrahieren und so die Lernumgebungen zu optimieren. Die Untersuchung all dieser Aspekte unter Verwendung eines Experimentell-Kontrollgruppen Designs wäre eine naheliegende Möglichkeit für zukünftige Studien. Insofern sind die Forschungsperspektiven zu virtuellen Lernumgebungen in der Bildung umfassend und arbeitsintensiv, enthalten jedoch ein großes Innovationspotenzial.

4 Literaturverzeichnis

- Abich, J., Reinerman-Jones, L., & Taylor, G. S. (2013). Investigating Workload Measures for Adaptive Training Systems. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 57(1), 2091–2095. <https://doi.org/10.1177/1541931213571466>
- Adams. (1987). Historical review and appraisal of research on the learning, retention, and transfer of human motor skills. *Psychological Bulletin*, 101(1), 41–74.
- Adams, D. M., Stull, A. T., & Hegarty, M. (2014). Effects of Mental and Manual Rotation Training on Mental and Manual Rotation Performance. *Spatial Cognition & Computation*, 14(3), 169–198. <https://doi.org/10.1080/13875868.2014.913050>
- Alhalabi, W. S. (2016). Virtual reality systems enhance students' achievements in engineering education. *Behaviour and Information Technology*, 35(11), 919–925. <https://doi.org/10.1080/0144929X.2016.1212931>
- Angermeier, W. F. (1972). *Kontrolle des Verhaltens. Das Lernen am Erfolg*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.
- Ariali, S., & Zinn, B. (2020). Virtual Reality Eine Studie zur chronometrischen Analyse der mentalen Rotationsfähigkeit. In B. Zinn (Ed.), *Virtual, Augmented und Cross Reality in Praxis und Forschung. Technologiebasierte Erfahrungswelten in der beruflichen Aus- und Weiterbildung* (pp. 243–256). Franz Steiner Verlag.
- Aymerich-Franch, L. (2018). Is mediated embodiment the response to embodied cognition? *New Ideas in Psychology*, 50, 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.newideapsych.2018.02.003>
- Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255(5044), 556–559. <https://doi.org/10.1126/science.1736359>
- Baenninger, M., & Newcombe, N. (1989). The role of experience in spatial test performance: A meta-analysis. *Sex Roles*, 20(5–6), 327–344. <https://doi.org/10.1007/BF00287729>
- Bauer, K. N., Brusso, R. C., & Orvis, K. A. (2012). Using Adaptive Difficulty to Optimize Videogame-Based Training Performance: The Moderating Role of Personality. *Military Psychology*, 24(2), 148–165. <https://doi.org/10.1080/08995605.2012.672908>
- Baykal, G. E., Alaca, I. V., Yantaç, A. E., & Göksun, T. (2018). A review on complementary natures of tangible user interfaces (TUIs) and early spatial learning. *International Journal of Child-Computer Interaction*, 16, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2018.01.003>
- Becker-Carus, C., & Wendt, M. (2017). Lernen. In C. Becker-Carus & M. Wendt (Eds.), *Allgemeine Psychologie* (pp. 291–351). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-53006-1_7
- Bekele, E., Young, M., Zheng, Z., Zhang, L., Swanson, A., Johnston, R., Davidson, J., Warren, Z., & Sarkar, N. (2013). A step towards adaptive multimodal virtual social interaction platform for children with autism. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8010 LNCS(PART 2), 464–473. https://doi.org/10.1007/978-3-642-39191-0_51
- Bente, G., Krämer, N. C., & Petersen, A. (2002). *Virtuelle Realitäten*. Göttingen: Hogrefe.
- Bian, D., Wade, J., Warren, Z., & Sarkar, N. (2016). Online engagement detection and task adaptation in a virtual reality based driving simulator for autism intervention.

- Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9739, 538–547.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-40238-3_51
- Biocca, F. (1997). The Cyborg's Dilemma: Progressive Embodiment in Virtual Environments [1]. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2).
<https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.1997.tb00070.x>
- Bleser, C. (2017). *Virtual Reality als gemeinsames Erlebnis. Entwicklung einer interaktiven Anwendung zur Echtzeitsynchronisation mobiler Endgeräte*. Hamburg: Diplomica Verlag.
- Botvinick, M., & Cohen, J. (1998). Rubber hands “feel” touch that eyes see. *Nature*, 391(6669), 756. <https://doi.org/10.1038/35784>
- Buchner, J., & Aretz, D. (2019). Lernen mit immersiver Virtual Reality: Didaktisches Design und Lessons Learned. *Zeitschrift MedienPädagogik*, 17(Jahrbuch Medienpädagogik), 195–216. <https://doi.org/10.21240/mpaed/jb17/2020.05.01.X>
- Caissie, A. F., Vigneau, F., & Bors, D. A. (2009). What does the Mental Rotation Test Measure? An Analysis of Item Difficulty and Item Characteristics. *The Open Psychology Journal*, 2(1), 94–102. <https://doi.org/10.2174/1874350100902010094>
- Carroll, J. B. (1993). *Human Cognitive Abilities: A Survey of Factor-Analytic Studies*. Cambridge University Press.
- Charles, D., McNeill, M., McAlister, M., Black, M. M., Moore, A., Stringer, K., Kücklich, J., & Kerr, A. (2005). Player-Centred Game Design: Player Modelling and Adaptive Digital Games. In *Proceedings of DiGRA 2005 Conference: Changing Views – Worlds in Play*. Digital Games Research Association: DiGRA (pp. 285–298). <file:///paper/Player-Centred-Game-Design%3A-Player-Modelling-and-Charles-McNeill/08cc13fce127bc81650dd898d6bcd9aab38fb90d>
- Chu, M., & Kita, S. (2011). The Nature of Gestures' Beneficial Role in Spatial Problem Solving. *Journal of Experimental Psychology: General*, 140(1), 102–116.
<https://doi.org/10.1037/a0021790>
- Città, G., Gentile, M., Allegra, M., Arrigo, M., Conti, D., Ottaviano, S., Reale, F., & Sciortino, M. (2019). The effects of mental rotation on computational thinking. *Computers & Education*, 141, 103613.
<https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103613>
- Cohen, M. S., Kosslyn, S. M., Breiter, H. C., Digirolamo, G. J., Thompson, W. L., Anderson, A. K., Bookheimer, S. Y., Rosen, B. R., & Belliveau, J. W. (1996). Changes in cortical activity during mental rotation: A mapping study using functional MRI. *Brain*, 119(1), 89–100. <https://doi.org/10.1093/brain/119.1.89>
- Colom, R., Contreras, M. J., Botella, J., & Santacreu, J. (2002). Vehicles of spatial ability. *Personality and Individual Differences*, 32(5), 903–912.
[https://doi.org/10.1016/S0191-8869\(01\)00095-2](https://doi.org/10.1016/S0191-8869(01)00095-2)
- Corbalan, G., Kester, L., & van Merriënboer, J. J. G. (2008). Selecting learning tasks: Effects of adaptation and shared control on learning efficiency and task involvement. *Contemporary Educational Psychology*, 33(4), 733–756.
<https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2008.02.003>
- Csikszentmihalyi, M. (1997). *Finding flow: The psychology of engagement with everyday life*. New York: Basic Books.
- Daniela, L., & Lytras, M. D. (2019). Editorial: themed issue on enhanced educational experience in virtual and augmented reality. *Virtual Reality*, 23(4), 325–327.
<https://doi.org/10.1007/s10055-019-00383-z>
- Dede, C. (2009). Immersive interfaces for engagement and learning. *Science*, 323(5910), 66–69. <https://doi.org/10.1126/science.1167311>
- Devlin, A. L., & Wilson, P. H. (2010). Adult age differences in the ability to mentally

- transform object and body stimuli. *Aging, Neuropsychology, and Cognition*, 17(6), 709–729. <https://doi.org/10.1080/13825585.2010.510554>
- Dewey, J. (1938). *Experience and education*. New York: Macmillan.
- Draper, M. H., Viirre, E. S., Furness, T. A., & Gawron, V. J. (2001). Effects of image scale and system time delay on simulator sickness within head-coupled virtual environments. *Human Factors*, 43(1), 129–146. <https://doi.org/10.1518/001872001775992552>
- Dünser, A., Steinbügl, K., Kaufmann, H., & Glück, J. (2006). Virtual and augmented reality as spatial ability training tools. *Proceedings of the 7th ACM SIGCHI New Zealand Chapter's International Conference on Computer-Human Interaction: Design Centered HCI*, 125–132. <https://doi.org/10.1145/1152760.1152776>
- Ekman, P. (1992). An Argument for Basic Emotions. *Cognition and Emotion*, 6(3–4), 169–200. <https://doi.org/10.1080/02699939208411068>
- Engeser, S., Rheinberg, F., Vollmeyer, R., & Bischoff, J. (2005). Motivation, Flow-Erleben und Lernleistung in universitären Lernsettings. *Zeitschrift Für Pädagogische Psychologie*, 19(3), 159–172. <https://doi.org/10.1024/1010-0652.19.3.159>
- Freina, L., & Ott, M. (2015). A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education: State Of The Art and Perspectives. *Proceedings of ELearning and Software for Education (ELSE)*. <http://www.google.com/patents/US3050870>
- Frey, A. (2012). *Adaptives Testen* (pp. 275–293). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20072-4_11
- Gandhi, R. D., & Pate, D. S. (2018). Virtual reality – opportunities and challenges. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 05(1), 482–490.
- Geiser, C., Lehmann, W., & Eid, M. (2006). Separating “rotators” from “Nonrotators” in the mental rotations test: A multigroup latent class analysis. *Multivariate Behavioral Research*, 41(3), 261–293. https://doi.org/10.1207/s15327906mbr4103_2
- Gerbaud, S., Gouranton, V., & Arnaldi, B. (2009). Adaptation in collaborative virtual environments for training. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 5670 LNCS, 316–327. https://doi.org/10.1007/978-3-642-03364-3_40
- Ginn, S. R., & Pickens, S. J. (2005). Relationships between spatial activities and scores on the mental rotation test as a function of sex. *Perceptual and Motor Skills*, 100(3 I), 877–881. <https://doi.org/10.2466/PMS.100.3.877-881>
- González-Franco, M., Pérez-Marcos, D., Spanlang, B., & Slater, M. (2010). The contribution of real-time mirror reflections of motor actions on virtual body ownership in an immersive virtual environment. *Proceedings - IEEE Virtual Reality*, 111–114. <https://doi.org/10.1109/VR.2010.5444805>
- Guay, R. B. (1978). *Factors Affecting Spatial Test Performance: Sex, Handedness, Birth Order, and Experience*.
- Hagen, I. (2017). Perception Virtuality. In M. Eibl & M. Gaedke (Eds.), *INFORMATIK 2017* (pp. 2525–2536). Gesellschaft für Informatik, Bonn. <http://dl.gi.de/handle/20.500.12116/4031>
- Hausmann, M., Slabbekoorn, D., Van Goozen, S. H. M., Cohen-Kettenis, P. T., & Güntürkün, O. (2000). Sex Hormones Affect Spatial Abilities During the Menstrual Cycle. *Behavioral Neuroscience*, 114(6), 1245–1250.
- Hegarty, & Waller, D. A. (2005). Individual Differences in Spatial Abilities. In P. Shah & A. Miyake (Eds.), *The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking* (pp. 121–170). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511610448.005>

- Heil, M., & Rolke, B. (2002). Toward a chronopsychophysiology of mental rotation. *Psychophysiology*, 39(4), 414–422. <https://doi.org/10.1017/S0048577202001105>
- Hendrix, C., & Barfield, W. (1995). Presence in virtual environments as a function of visual and auditory cues. *Virtual Reality Annual International Symposium*, 74–82.
- Jäncke, L., & Jordan, K. (2007). Functional Neuroanatomy of Mental Rotation Performance. In F. Mast & L. Jäncke (Eds.), *Spatial Processing in Navigation, Imagery and Perception* (pp. 183–207). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-0-387-71978-8_12
- Jensen, L., & Konradsen, F. (2018). A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training. *Education and Information Technologies*, 23(4), 1515–1529. <https://doi.org/10.1007/s10639-017-9676-0>
- Kass, S. J., Ahlers, R. H., & Dugger, M. (1998). Eliminating Gender Differences Through Practice in an applied visual spatial task. *Human Performance*, 11(4), 337–349. https://doi.org/10.1207/s15327043hup1104_3
- Katzky, U., Höntzsch, S., Bredl, K., Kappe, F., & Krause, D. (2013). Simulationen und simulierte Welten. Lernen in immersiven Lernumgebungen. In M. Ebner, S. Schön, & C. Frey (Eds.), *L3T Lehrbuch für Lernen und Lehren mit Technologien*. <http://l3t.eu/homepage/das-buch/ebook-2013/kapitel/o/id/102/name/simulationen-und-simulierte-welten>
- Kelley, C. R. (1969). What is Adaptive Training? *Human Factors: The Journal of Human Factors and Ergonomics Society*, 11(6), 547–556. <https://doi.org/10.1177/001872086901100602>
- Kessler, K., & Rutherford, H. (2010). The two forms of visuo-spatial perspective taking are differently embodied and subserve different spatial prepositions. *Frontiers in Psychology*, 1(DEC), 213. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2010.00213>
- Kolb, D. A. (1984). *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.
- Korgel, D. (2017). *Virtual Reality-Spiele entwickeln mit Unity?* München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.
- Kozhevnikov, M., Cheng, L. R., & Kozhevnikov, M. (2015). Effect of Environment Immersivity on Encoding Strategies of Spatial Tasks. *Procedia Manufacturing*, 3, 5059–5066. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.519>
- Kreimeier, J., Hammer, S., Friedmann, D., Karg, P., Bühner, C., Bankel, L., & Götzelmann, T. (2019). Evaluation of Dierent Types of Haptic Feedback Influencing the Task-based Presence and Performance in Virtual Reality. *ACM International Conference Proceeding Series*, 19, 289–298. <https://doi.org/10.1145/3316782.3321536>
- Kultusministeriumkonferenz (KMK). (2007). *Handreichung für die Erarbeitung von Rahmenlehrplänen der Kultusministerkonferenz für den berufsbezogenen Unterricht in der Berufsschule und ihre Abstimmung mit Ausbildungsordnungen des Bundes für anerkannte Ausbildungsberufe*. <http://www.kmk.org>
- Kwon, C. (2019). Verification of the possibility and effectiveness of experiential learning using HMD-based immersive VR technologies. *Virtual Reality*, 23(1), 101–118. <https://doi.org/10.1007/s10055-018-0364-1>
- Kyllonen, P. C., Lohman, D. F., & Snow, R. E. (1984). Effects of aptitudes, strategy training, and task facets on spatial task performance. *Journal of Educational Psychology*, 76(1), 130–145. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.76.1.130>
- Landsberg, C. R., Mercado, A. D., Van Buskirk, W. L., Lineberry, M., & Steinhauser, N. (2012). Evaluation of an adaptive training system for submarine periscope operations. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society*, 2422–2426. <https://doi.org/10.1177/1071181312561493>

- Lane, D., Lynch, R., & McGarr, O. (2019). Problematizing spatial literacy within the school curriculum. *International Journal of Technology and Design Education*, 29(4), 685–700. <https://doi.org/10.1007/s10798-018-9467-y>
- Lave, J., & Wenger, E. (1991). Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation. In *Situated Learning*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511815355>
- Linn, M. C., & Petersen, A. C. (1985). Emergence and Characterization of Sex Differences in Spatial Ability: A Meta-Analysis. *Child Development*, 56(6), 1479–1498. <https://doi.org/10.2307/1130467>
- Liu, X., Huang, H., Yu, K., & Dou, D. (2020). Can video game training improve the two-dimensional mental rotation ability of young children?: A randomized controlled trial. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 12211 LNCS, 305–317. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50164-8_22
- Lockman, J. J., Fears, N. E., & Lewis, E. A. (2018). Spatial Development. In *Oxford Research Encyclopedia of Psychology*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190236557.013.63>
- Loke, S. K. (2015). How do virtual world experiences bring about learning? A critical review of theories. *Australasian Journal of Educational Technology*, 31(1), 112–122. <https://doi.org/10.14742/ajet.2532>
- Lombard, M., & Ditton, T. (1997). At the Heart of It All: The Concept of Presence. *Journal of Computer-Mediated Communication*, 3(2). <https://doi.org/10.1111/j.1083-6101.1997.tb00072.x>
- Loup, G., Serna, A., Iksal, S., & George, S. (2016). Immersion and persistence: improving learners' engagement in authentic learning situations. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9891 LNCS, 410–415. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45153-4_35
- Maeda, Y., & Yoon, S. Y. (2013). A Meta-Analysis on Gender Differences in Mental Rotation Ability Measured by the Purdue Spatial Visualization Tests: Visualization of Rotations (PSVT:R). *Educational Psychology Review*, 25(1), 69–94. <https://doi.org/10.1007/s10648-012-9215-x>
- Maraj, C. S., Badillo-Urquiola, K. A., Lackey, S. J., & Hudson, I. L. (2017). Behavior cue detection training: Understanding the impact of simulator sickness on performance. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 498, 645–652. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42070-7_60
- Maselli, A., & Slater, M. (2013). The building blocks of the full body ownership illusion. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7, 83. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00083>
- Monahan, J. S., Harke, M. A., & Shelley, J. R. (2008). Computerizing the Mental Rotations Test: Are gender differences maintained? *Behavior Research Methods*, 40(2), 422–427. <https://doi.org/10.3758/BRM.40.2.422>
- Mourning, R., & Ying, T. (2017). Virtual reality social training for adolescents with high-functioning autism. *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2016 - Conference Proceedings*, 4848–4853. <https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844996>
- mpfs. (2018). *JIM-Studie 2018: Jugend, Information, Medien. Basisuntersuchung zum Medienumgang 12- bis 19-Jähriger*. [ps://www.mpfs.de/studien/kim-studie/2018/](https://www.mpfs.de/studien/kim-studie/2018/)
- mpfs. (2020). *JIM-Studie 2020: Jugend, Information, Medien. Basisuntersuchung zum Medienumgang 12- bis 19-Jähriger*. <https://www.mpfs.de/studien/kim-studie/2020/>
- Murcia-López, M., & Steed, A. (2016). The Effect of Environmental Features, Self-

- Avatar, and Immersion on Object Location Memory in Virtual Environments. *Frontiers in ICT*, 3, 1–10. <https://doi.org/10.3389/fict.2016.00024>
- Ortner, T. M., & Sieverding, M. (2008). Where are the gender differences? Male priming boosts spatial skills in women. *Sex Roles*, 59(3–4), 274–281. <https://doi.org/10.1007/s11199-008-9448-9>
- Oxman, S., & Wong, W. (2014). White Paper : Adaptive Learning Systems. *Integrated Education Solutions*.
- Paramythis, A., & Loidl-Reisinger, S. (2004). Adaptive Learning Environments and e-Learning Standards. *Electronic Journal of E-Learning*, 2(1), 181–194.
- Park, O., & Lee, J. (2003). Adaptive instructional systems. In D. Jonassen (Ed.), *Handbook of research for educational communications and technology* (pp. 651–685). Lawrence Erlbaum Associates.
- Parsons, T. D., Larson, P., Kratz, K., Thieboux, M., Bluestein, B., Buckwalter, J. G., & Rizzo, A. A. (2004). Sex differences in mental rotation and spatial rotation in a virtual environment. *Neuropsychologia*, 42(4), 555–562. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2003.08.014>
- Peters, M., Laeng, B., Latham, K., Jackson, M., Zaiyouna, R., & Richardson, C. (1995). A redrawn vanderberg and kuse mental rotations test - different versions and factors that affect performance. *Brain and Cognition*, 28(1), 39–58. <https://doi.org/10.1006/brcg.1995.1032>
- Pittich, D., & Tenberg, R. (2020). Editorial: Hybride Lernlandschaften im beruflichen Unterricht. *Journal of Technical Education (JOTED)*, 8(2), 13–25. <https://doi.org/10.48513/JOTED.V8I2.209>
- Plancher, G., Barra, J., Orriols, E., & Piolino, P. (2013). The influence of action on episodic memory: A virtual reality study. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 66(5), 895–909. <https://doi.org/10.1080/17470218.2012.722657>
- Quaiser-Pohl, C., Geiser, C., & Lehmann, W. (2006). The relationship between computer-game preference, gender, and mental-rotation ability. *Personality and Individual Differences*, 40(3), 609–619. <https://doi.org/10.1016/j.paid.2005.07.015>
- Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). Computers & Education A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education : Design elements , lessons learned , and research agenda. *Computers & Education*, 147, 103778. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778>
- Reiners, T., Wood, L. C., & Gregory, S. (2014). Experimental study on consumer-technology supported authentic immersion in virtual environments for education and vocational training. In B. Hegarty, J. McDonald, & S.-K. Loke (Eds.), *Rhetoric and Reality: Critical perspectives on educational technology. Proceedings ascilite Dunedin 2014* (pp. 171–181).
- Riskind, J. H., & Gotay, C. C. (1982). Physical posture: Could it have regulatory or feedback effects on motivation and emotion? *Motivation and Emotion*, 6(3), 273–298. <https://doi.org/10.1007/BF00992249>
- Rizzo, A. A., Buckwalter, J. G., McGee, J. S., Bowerly, T., Van Der Zaag, C., Neumann, U., Thieboux, M., Kim, L., Pair, J., & Chua, C. (2001). Virtual environments for assessing and rehabilitating cognitive/functional performance: A review of projects at the USC Integrated Media Systems Center. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 10(4), 359–374. <https://doi.org/10.1162/1054746011470226>
- Robertson, G. G., Card, S. K., & Mackinlay, J. D. (1993). Nonimmersive virtual reality. *Computer*, 26(2), 81. <https://doi.org/10.1109/2.192002>
- Rogers. (2019). *Virtual Reality: The learning aid of the 21st century*. Forbes. <https://www.forbes.com/sites/solrogers/2019/03/15/virtual-reality-the-learning-aid->

- of-the-21st-century/#2e403c6a139b
- Schenk, M., Blümel, E., & Jenewein, K. (2010). Virtuelle Realitäten als Lernräume. *Lernen Und Lehren*, 25(Nr.97), 6–13.
- Sepp, S., Howard, S. J., Tindall-Ford, S., Agostinho, S., & Paas, F. (2019). Cognitive Load Theory and Human Movement: Towards an Integrated Model of Working Memory. *Educational Psychology Review*, 31, 293–317.
<https://doi.org/10.1007/s10648-019-09461-9>
- Seurinck, R., Vingerhoets, G., De Lange, F. P., & Achten, E. (2004). Does egocentric mental rotation elicit sex differences? *NeuroImage*, 23(4), 1440–1449.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.08.010>
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171(3972), 701–703. <https://doi.org/10.1126/science.171.3972.701>
- Sherry, J. L. (2004). Flow and Media Enjoyment. *Communication Theory*, 14(4), 328–347. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2885.2004.tb00318.x>
- Slater, M. (1999). Measuring Presence: A Response to the Witmer and Singer Presence Questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 8(5), 560–565.
<https://doi.org/10.1162/105474699566477>
- Steuer, J. (1992). Defining Virtual Reality: Dimensions Determining Telepresence. *Journal of Communication*, 42(4), 73–93. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2466.1992.tb00812.x>
- Stieff, M., Origenes, A., DeSutter, D., Lira, M., Banevicius, L., Tabang, D., & Cabel, G. (2018). Operational constraints on the mental rotation of STEM representations. *Journal of Educational Psychology*, 110(8), 1160–1174.
<https://doi.org/10.1037/edu0000258>
- Storch, M., Tschacher, W., Hüther, G., & Cantieni, B. (2010). *Embodiment. Die Wechselwirkung von Körper und Psyche verstehen und nutzen*. Bern: Huber.
- Strack, F., Martin, L. L., & Stepper, S. (1988). Inhibiting and Facilitating Conditions of the Human Smile: A Nonobtrusive Test of the Facial Feedback Hypothesis. *Journal of Personality and Social Psychology*, 54(5), 768–777.
<https://doi.org/10.1037/0022-3514.54.5.768>
- Sutherland. (1965). The ultimate display. *Proceedings of the International Federation of Information Processing Congress*, 506–508.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257–285. [https://doi.org/10.1016/0364-0213\(88\)90023-7](https://doi.org/10.1016/0364-0213(88)90023-7)
- Sweller, J. (2011). CHAPTER TWO - Cognitive Load Theory. *Psychology of Learning and Motivation*, 55, 37–76.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123876911000028>
- Thomsen, T., Hugdahl, K., Erslund, L., Barndon, R., Lundervold, A., Smievol, A. I., Roscher, B. E., & Sundberg, H. (2000). Functional magnetic resonance imaging (fMRI) study of sex differences in a mental rotation task. *Medical Science Monitor*, 6(6), 1186–1196.
<https://www.medscimonit.com/download/index/idArt/421166>
- Thurstone, L. L. (1938). *Primary mental abilities*. University of Chicago Press.
<https://psycnet.apa.org/record/1938-15070-000>
- Treleaven, J., Battershill, J., Cole, D., Fadelli, C., Freestone, S., Lang, K., & Sarig-Bahat, H. (2015). Simulator sickness incidence and susceptibility during neck motion-controlled virtual reality tasks. *Virtual Reality*, 19(3–4), 267–275.
<https://doi.org/10.1007/s10055-015-0266-4>
- Um, N. (2020). Do Gender, Types of VR Game, & Virtual Presence Matter in VR Games? *International JOURNAL OF CONTENTS*, 16(4), 78–83.
<https://www.dbpia.co.kr/Journal/articleDetail?nodeId=NODE10511098>

- Uttal, D. H., & Cohen, C. A. (2012). Spatial Thinking and STEM Education. When, Why, and How? *Psychology of Learning and Motivation - Advances in Research and Theory*, 57, 147–181. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394293-7.00004-2>
- Uttal, D. H., Meadow, N. G., Tipton, E., Hand, L. L., Alden, A. R., Warren, C., & Newcombe, N. S. (2013). The malleability of spatial skills: A meta-analysis of training studies. *Psychological Bulletin*, 139(2), 352–402. <https://doi.org/10.1037/a0028446>
- Vandenberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills*, 47(2), 599–604. <https://doi.org/10.2466/pms.1978.47.2.599>
- Vaughan, N., Gabrys, B., & Dubey, V. N. (2016). An overview of self-adaptive technologies within virtual reality training. *Computer Science Review*, 22, 65–87. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2016.09.001>
- Velev, D., & Zlateva, P. (2017). Virtual Reality Challenges in Education and Training. *International Journal of Learning and Teaching*. <https://doi.org/10.18178/ijlt.3.1.33-37>
- Verdine, B. N., Golinkoff, R. M., Hirsh-Pasek, K., & Newcombe, N. S. (2017). I. Spatial Skills, Their Development, and Their Links to Mathematics. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 82(1), 7–30. <https://doi.org/10.1111/mono.12280>
- Voiskounsky, A. E., Mitina, O. V., & Avetisova, A. A. (2004). Playing Online Games: Flow Experience. *PsychNology Journal*, 2(3), 259–281.
- Voyer, D. (2011). Time limits and gender differences on paper-and-pencil tests of mental rotation: A meta-analysis. *Psychonomic Bulletin and Review*, 18(2), 267–277. <https://doi.org/10.3758/s13423-010-0042-0>
- Voyer, D., Rodgers, M. A., & McCormick, P. A. (2004). Timing conditions and the magnitude of gender differences on the Mental Rotations Test. *Memory and Cognition*, 32(1), 72–82. <https://doi.org/10.3758/BF03195821>
- Voyer, D., Saint-Aubin, J., Altman, K., & Doyle, R. A. (2020). Sex differences in tests of mental rotation: Direct manipulation of strategies with eye-tracking. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 46(9), 871–889. <https://doi.org/10.1037/xhp0000752>
- Voyer, D., Voyer, S., & Bryden, M. P. (1995). Magnitude of sex differences in spatial abilities: A meta-analysis and consideration of critical variables. *Psychological Bulletin*, 117(2), 250–270. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.117.2.250>
- Wai, J., Lubinski, D., & Benbow, C. P. (2009). Spatial Ability for STEM Domains: Aligning Over 50 Years of Cumulative Psychological Knowledge Solidifies Its Importance. *Journal of Educational Psychology*, 101(4), 817–835. <https://doi.org/10.1037/a0016127>
- Wai, J., & Uttal, D. H. (2018). Why Spatial Reasoning Matters for Education Policy. *American Enterprise Institute*.
- Wang, L., Du, S., Liu, H., Yu, J., Cheng, S., & Xie, P. (2017). A virtual rehabilitation system based on EEG-EMG feedback control. *Proceedings - 2017 Chinese Automation Congress, CAC 2017, 2017-January*, 4337–4340. <https://doi.org/10.1109/CAC.2017.8243542>
- Wiedenbauer, G., & Jansen-Osmann, P. (2008). Manual training of mental rotation in children. *Learning and Instruction*, 18(1), 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2006.09.009>
- Wiedenbauer, G., Schmid, J., & Jansen-Osmann, P. (2007). Manual training of mental rotation. *European Journal of Cognitive Psychology*, 19(1), 17–36. <https://doi.org/10.1080/09541440600709906>

- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625–636. <https://doi.org/10.3758/BF03196322>
- Witmer, B. G., & Singer, M. J. (1998). Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(3), 225–240. <https://doi.org/10.1162/105474698565686>
- Wohlschläger, A., & Wohlschläger, A. (1998). Mental and manual rotation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(2), 397–412. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.24.2.397>
- Wright, R., Thompson, W. L., Ganis, G., Newcombe, N. S., & Kosslyn, S. M. (2008). Training generalized spatial skills. *Psychonomic Bulletin and Review*, 15(4), 763–771. <https://doi.org/10.3758/PBR.15.4.763>
- Yerkes, R., & Dodson, J. (1908). The relation of strength of stimulus to rapidity of habit-formation. *J Comp Neurol Psychol*, 18(5), 459–482.
- Zahabi, M., Park, J., Razak, A. M. A., & McDonald, A. D. (2020). Adaptive driving simulation-based training: framework, status, and needs. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 21(5), 537–561. <https://doi.org/10.1080/1463922X.2019.1698673>
- Zahabi, M., & Razak, A. M. A. (2020). Adaptive virtual reality-based training: a systematic literature review and framework. *Virtual Reality*, 24, 725–752.
- Zeltzer, D. (1992). Autonomy, Interaction, and Presence. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 1(1), 127–132. <https://doi.org/10.1162/pres.1992.1.1.127>
- Zinn, B. (2017). Digitalisierung der Arbeit – Kompetenzerwartungen des Beschäftigungssystems und didaktische Implikationen. In B. Bonz, H. Schanz, & J. Seifried (Eds.), *Berufsbildung vor neuen Herausforderungen – Wandel von Arbeit und Wirtschaft, Berufsbildung konkret* (pp. 163–176). Schneider Verlag Hohengehren GmbH.
- Zinn, B. (2019). Editorial: Lehren und Lernen zwischen Virtualität und Realität. *Band*, 7(1). <http://www.journal-of-technical-education.de>
- Zinn, B., & Ariali, S. (2020). Technologiebasierte Erfahrungswelten – Lehren und Lernen zwischen Virtualität und Realität. In B. Zinn (Ed.), *Virtual, Augmented und Cross Reality in Praxis und Forschung. Technologiebasierte Erfahrungswelten in der beruflichen Aus- und Weiterbildung*. Franz Steiner Verlag.
- Zinn, B., Guo, Q., & Sari, D. (2016). Entwicklung und Evaluation der virtuellen Lern- und Arbeitsumgebung VILA. *Journal of Technical Education (JOTED)*, 4(1). <http://www.journal-of-technical-education.de/index.php/joted/article/view/71>

Lebenslauf

- Seit 2016 Wissenschaftliche Mitarbeiterin und Doktorandin am Lehrstuhl für Berufspädagogik mit Schwerpunkt Technikdidaktik (BPT) an der Universität Stuttgart
- 2016 **Abschluss: Bachelor of Science**
- 2014-2016 Studium an der Universität Tübingen, Studienfach: Informatik
- 2013-2014 Tätigkeit als studentische Hilfskraft am Leibniz-Institut für Wissensmedien, Tübingen
- 2012-2013 Tätigkeit als studentische Hilfskraft am psychologischen Institut der Universität Tübingen
- 2014 **Abschluss: Diplom-Psychologin**
- 2007-2014 Studium an der Universität Tübingen, Studienfach: Psychologie
- 2003-2005 Studium an der staatlichen Ivane Javachishvili Universität Tiflis, Georgien, Studienfach: Psychologie