

SUNITA ARIALI (Universität Stuttgart)

BERND ZINN (Universität Stuttgart)

Virtuelle Umgebungen zur Analyse der mentalen Rotationsfähigkeit

Herausgeber

BERND ZINN

RALF TENBERG

DANIEL PITTICH

Journal of Technical Education (JOTED)

ISSN 2198-0306

Online unter: <http://www.journal-of-technical-education.de>

SUNITA ARIALI / BERND ZINN

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.

Schlüsselwörter: virtuelle Realität, mentale Rotation, Intelligenz, räumliches Vorstellungsvermögen

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.

Keywords: virtual reality, mental rotation, intelligence, spatial ability

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 Rotationstests 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 darauf folgend 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 Bezugsfeld 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 bei-

den 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 desktopbasierten Darstellung (nicht immersive Technologie) darin, dass die Betrachtung der Umgebung 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.

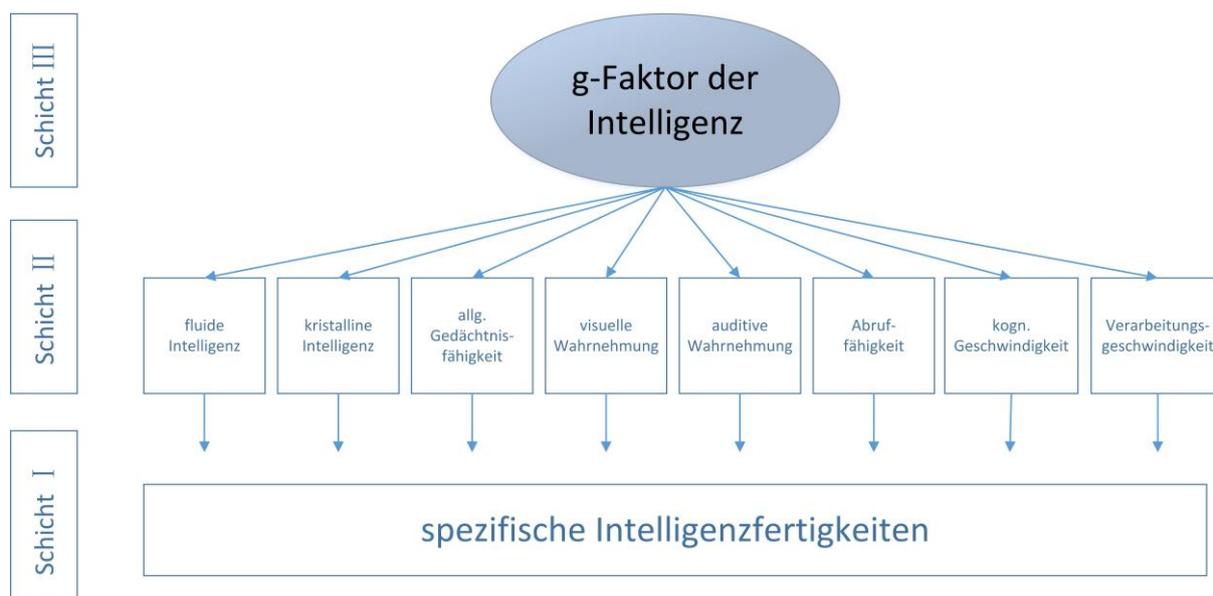


Abb. 1: Carrolls (1993) „Three stratum-Modell“ der kognitiven Fähigkeiten in übersetzter und modifizierter Form (Quelle: Holling, Preckel & Vock 2004, S. 28). Ganz oben (Schicht III) steht der sogenannte (generelle) g-Faktor der Intelligenz, eine Ebene tiefer (Schicht II) sind die acht „breite Fähigkeiten“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

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

($N = 213$) 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 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) modifizierten 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.

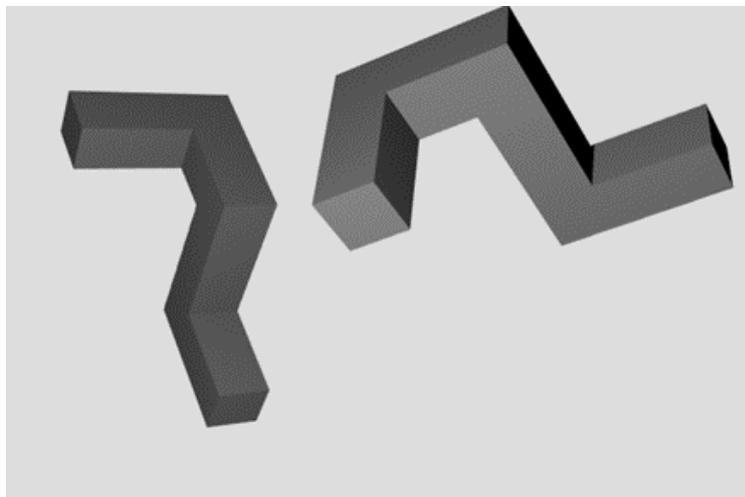


Abb. 2: Beispielaufgabe aus dem 3-D-MRT (eigene Darstellung)

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 in-

formiert, 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^2 berechnet. Die Auswertung wurde mithilfe des Programms R (Version 3.4.4) vorgenommen, wobei für die Regressionsanalyse das Package „lme4“ verwendet wurde.

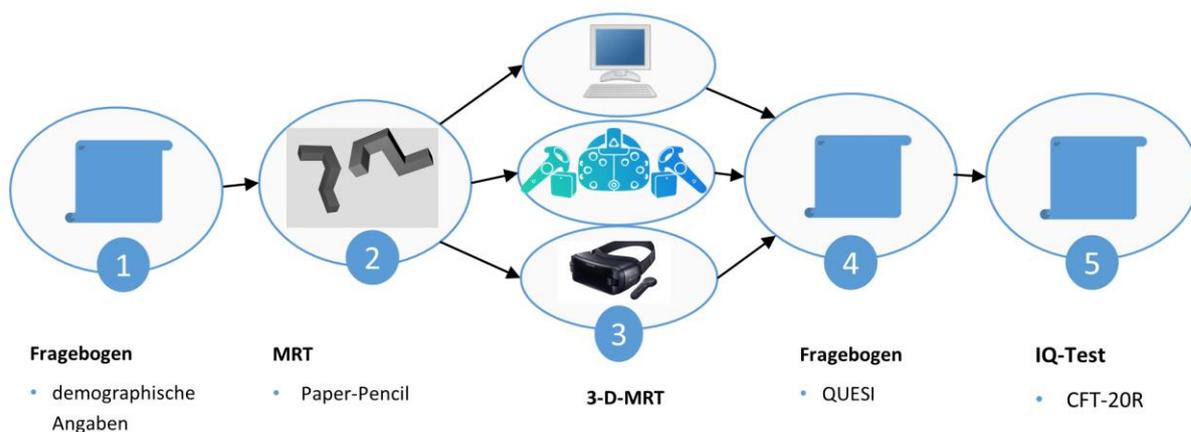


Abb. 3: Schematische Darstellung des Ablaufs der Untersuchung (eigene Darstellung).

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 be-

2 Nach Cohen (1988) liegt d zwischen 0.2 - 0.5 ein kleiner, zwischen 0.5 – 0.8 ein mittlerer und > 0.8 ein starker Effekt vor.

richtet. 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

<i>3-D-MRT Items</i>	<i>m</i>	<i>m (mit Ratekorrektur)</i>	<i>sd</i>	<i>Trennschärfe</i>	<i>α, wenn Item gelöscht</i>
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 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.

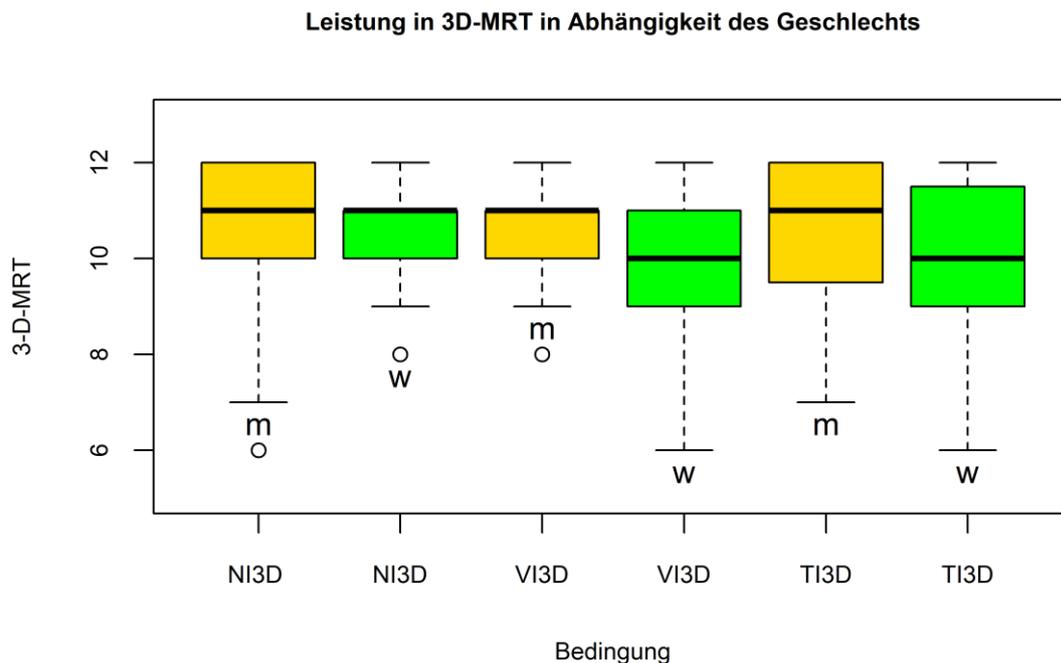


Abb. 4: Darstellung der Leistung im 3D-MRT in Abhängigkeit der Bedingung (NI3D = nicht-immersive 3D-Darstellung, TI3D = teil-immersive 3D-Darstellung, VI3D = voll-immersive 3D-Darstellung,) und des Geschlechts (m = männlich; w = weiblich; eigene Berechnung)

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 (H 4). 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	B	SE(B)	β	t	p
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.

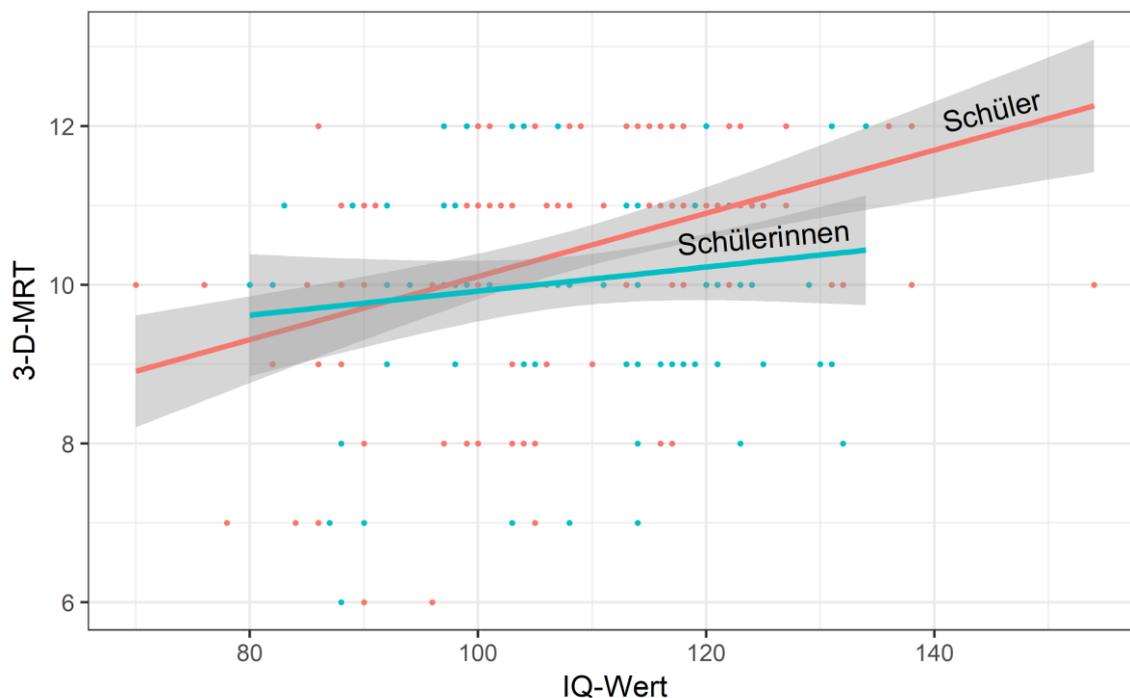


Abb. 5: Zusammenhang zwischen dem IQ und der Leistung im 3-D-MRT, getrennt für Schülerinnen und Schüler dargestellt. Die Linien veranschaulichen die Regressionsgeraden der Schülerinnen und Schüler und die grauen Bereiche stellen die jeweiligen 95% Konfidenzintervalle dar.

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 Abhän-

gigkeit 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.

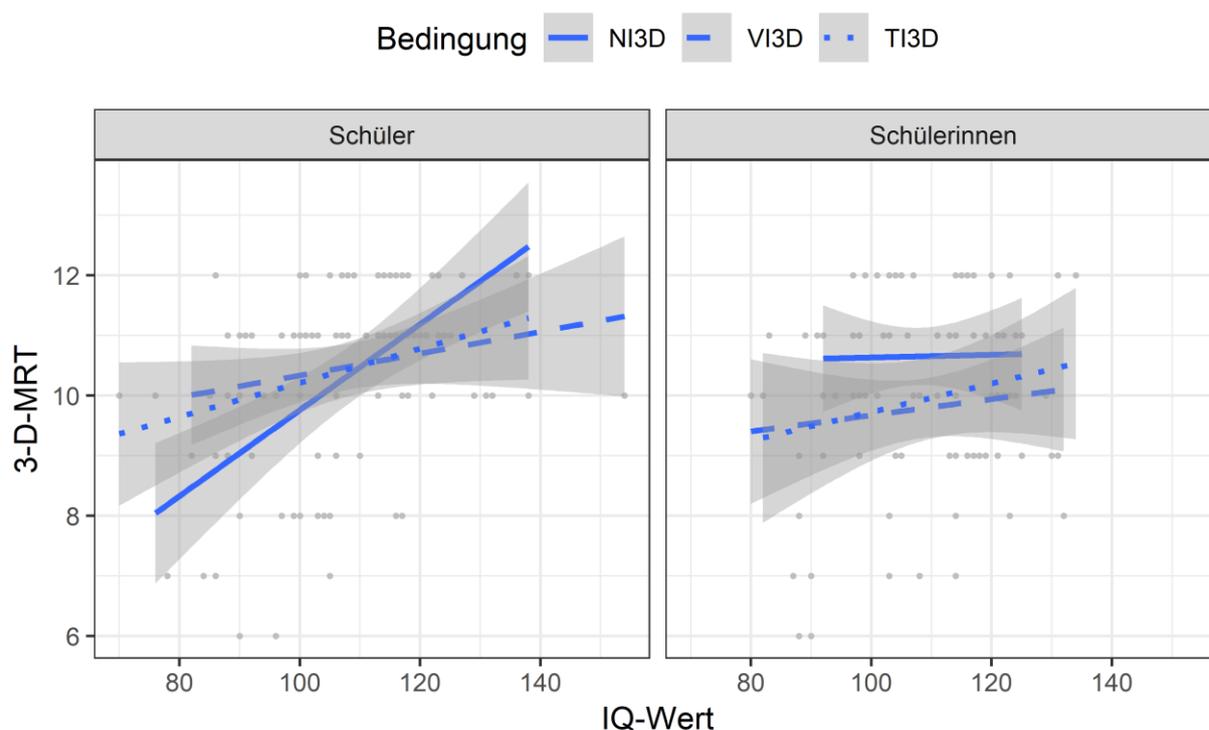


Abb. 6: Interaktion zwischen der Bedingung und dem IQ, getrennt für Schülerinnen und Schüler dargestellt. Die Linien veranschaulichen die Regressionsgeraden in den verschiedenen Bedingungen und die grauen Bereiche stellen die jeweiligen 95% Konfidenzintervalle dar.

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 fluider 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 fluider 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 fluider 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.

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 Hohengehren 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.

DIPL.- PSYCH. SUNITA ARIALI
Universität Stuttgart, Institut für Erziehungswissenschaft
Berufspädagogik mit Schwerpunkt Technikdidaktik (BPT)
Azenbergstraße 12, 70174 Stuttgart
ariali@ife.uni-stuttgart.de

PROF. DR. BERND ZINN
Universität Stuttgart, Institut für Erziehungswissenschaft
Berufspädagogik mit Schwerpunkt Technikdidaktik (BPT)
Azenbergstraße 12, 70174 Stuttgart
zinn@ife.uni-stuttgart.de

Zitieren dieses Beitrags:

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