

Themenheft Nr. 51:

Immersives Lehren und Lernen mit Augmented und Virtual Reality – Teil 2.

Herausgegeben von Miriam Mulders, Josef Buchner, Andreas Dengel und Raphael Zender

Konzeption und Evaluation einer virtuellen Lernumgebung für die Hochschullehre

Sinja Müser¹ , Jens Maiero² , Christian Dominic Fehling³ , David Gilbert⁴ , Sevinc Eroglu⁴, Daniel Bachmann², Sebastian Wiederspohn²  und Jörg Meyer¹ 

¹ Hochschule Hamm-Lippstadt

² Hochschule Bonn-Rhein-Sieg

³ Bergische Universität Wuppertal

⁴ RWTH Aachen University

Zusammenfassung

Das Interesse an Virtual Reality (VR) für die Hochschullehre steigt aktuell vermehrt durch die Möglichkeit, logistisch schwierige Aufgaben abzubilden sowie aufgrund positiver Ergebnisse aus Wirksamkeitsstudien. Gleichzeitig fehlt es jedoch an Studien, die immersive VR-Umgebungen, nicht-immersive Desktop-Umgebungen und konventionelle Lernmaterialien gegenüberstellen und lehr-lernmethodische Aspekte evaluieren. Aus diesem Grund beschäftigt sich dieser Beitrag mit der Konzeption und Realisierung einer Lernumgebung für die Hochschullehre, die sowohl mit einem Head Mounted Display (HMD) als auch mittels Desktops genutzt werden kann, sowie deren Evaluation anhand eines experimentellen Gruppendesigns. Die Lernumgebung wurde auf Basis einer eigens entwickelten Softwareplattform erstellt und die Wirksamkeit mithilfe von zwei Experimentalgruppen – VR vs. Desktop-Umgebung – und einer Kontrollgruppe evaluiert und verglichen. In einer Pilotstudie konnten sowohl qualitativ als auch quantitativ positive Einschätzungen der Usability der Lernumgebung in beiden Experimentalgruppen herausgestellt werden. Darüber hinaus zeigten sich positive Effekte auf die kognitive und affektive Wirkung der Lernumgebung im Vergleich zu konventionellen Lernmaterialien. Unterschiede zwischen der Nutzung als VR- oder Desktop-Umgebung zeigen sich auf kognitiver und affektiver Ebene jedoch kaum. Die Analyse von Log-Daten deutet allerdings auf Unterschiede im Lern- und Explorationsverhalten hin.

Design and Evaluation of a Virtual Learning Environment for Higher Education

Abstract

Interest in Virtual Reality (VR) for higher education is currently increasing due to the feasibility of logistically difficult tasks in combination with positive results from effectiveness studies. At the same time, however, there is a lack of studies comparing immersive VR environments with non-immersive desktop environments and conventional learning materials, and evaluating aspects of teaching and learning. Therefore, this paper deals with the design and realization of a learning environment for higher education that can be used via Head Mounted Display (HMD) as well as via desktop, and its evaluation using a between group design. The learning environment was created on the basis of a self-developed software platform and its effectiveness was evaluated and compared with the data of two experimental groups – VR vs. desktop environment – and a control group. In a pilot study, both qualitatively and quantitatively positive assessments of the usability of the learning environment were found by both experimental groups. Furthermore, positive effects on the cognitive and affective impact of the learning environment were found in comparison to conventional learning material. Differences between the use as VR or desktop environment on a cognitive and affective level are only slight. The analysis of log data, however, suggests differences in learning and exploration behavior.

1. Einleitung

Die konstruktivistische Lerntheorie geht davon aus, dass Wissen durch die Interaktion des Einzelnen mit seiner Umwelt entsteht (Rustemeyer 1999). Sie postuliert, dass Wissen durch kognitive Prozesse und Informationsverarbeitung entsteht, die durch Aufmerksamkeit (z. B. anschauliche Darstellung des Lerninhaltes) sowie die Aktivierung möglichst vieler Sinne angeregt werden können (Reinmann 2013). Den Lerntheorien zuordenbare Modelle und didaktische Gestaltungsprinzipien – wie das 4C/ID (van Merriënboer 2020), die Cognitive Theory of Multimedia Learning (CTML; Mayer 2014a) oder auch die Cognitive Load Theory (CLT; Paas und Sweller 2014; Sweller 2010) – zeigen evidenzbasierte Strategien auf, die das Lernen fördern können. Darüber hinaus scheinen immer neue Lernansätze hinzuzukommen, beispielsweise das Embodied Learning (Macedonia 2019), bei dem das Lernen durch körperliche Erfahrungen unterstützt werden kann. Allerdings sind nur wenige Lehr-Lern-Arrangements in der Lage, all solche lernförderlichen Theorien, Modelle und Prinzipien sinnvoll kombiniert umzusetzen und damit bestmögliches Lernen zu ermöglichen.

Eine Lösung, die die Umsetzung möglichst vieler lernförderlicher Strategien und Prinzipien ermöglichen kann, ist das Lernen mithilfe immersiver virtueller Lernumgebungen. Zu beachten ist hierbei sicherlich, dass sich traditionelle, aus

nicht-immersiven Medien resultierende Prinzipien der didaktischen Gestaltung nicht immer direkt auf Virtual Reality-Anwendungen übertragen lassen, die Möglichkeiten jedoch bei weitem vielfältiger sind. Gängige Designprinzipien nach Mayer (2014b) sind beispielsweise das Redundanzprinzip, das besagt, dass die audiovisuelle Präsentation von Bild- und Textinformationen in Bild und Ton lernförderlicher ist als die redundante Präsentation derselben Informationen in Bild, Ton und Text, oder das Modalitätsprinzips, das besagt, dass die Verwendung von gesprochenem statt geschriebenem Text zur Begleitung bildlicher Darstellungen lernförderlich wirkt. In aktuellen Studien finden sich allerdings Hinweise, dass diese Designprinzipien, wie auch das Prinzip der Signalisierung (Einfügen von Hinweisen, z. B. Hervorhebungen, die den wesentlichen Inhalt betonen) und Segmentierung (Präsentation von Aufgabe in benutzergesteuerten Abschnitten und statt kontinuierlicher Lerneinheiten) in Virtual Reality-Anwendungen nicht gleich der Wirkung in konventionellem multimedialem Lernmaterial zu sein scheinen oder teilweise sogar in umgekehrter Form zu wirken (Baceviciute et al. 2021; Albus et al. 2021; Vogt et al. 2021).

Virtuelle Lernumgebungen stützen sich auf computergenerierte Darstellungen von realen oder fiktionalen Umgebungen, die dreidimensional und interaktiv sind (Schwan und Buder 2006). Immersion meint dabei das objektive Mass, welches die Umgebung als real erscheinen lässt, indem das System die Aussenwelt ausblendet (Cummings und Bailenson 2016). Nicht-immersive VR- oder auch Desktop-Umgebungen, welche die Interaktion vor allem mittels PC, Tastatur und Maus ermöglichen, lassen sich von immersiven VR-Umgebungen unterscheiden, welche in der Regel durch am Kopf getragene Head Mounted Displays (HMD) präsentiert werden (Merchant et al. 2014). Durch die Begegnung mit visuellen, auditiven und haptischen Reizen sowie durch unterschiedliche Interaktionsmöglichkeiten simulieren diese Umgebungen eine eigene Realität (Brill 2009). Als Interaktionsmetaphern lassen sich in diesem Zusammenhang Möglichkeiten der Interaktion und Manipulation virtueller Objekte sowie zur Navigation virtueller Umgebungen verstehen, die Anwendenden in Virtual Reality zur Verfügung stehen. Diese können sowohl an natürliche Interaktionen angelehnt sein (z. B. Greifen, Werfen, Gehen) als auch über die real möglichen Metaphern hinausgehen (z. B. Telekinesis, Teleport). Die kognitiven Zustände, die das Lernen während der Aktivität in immersiven virtuellen Lernumgebungen beeinflussen, bezeichnen letztendlich das «immersive Lernen» (Scoresby und Shelton 2011). Desktop-Umgebungen stellen dabei eine Alternative zur immersiven VR dar und können ebenfalls produktiv zum Lernen eingesetzt werden (Merchant et al. 2014).

VR zu Lehr-Lernzwecken zu nutzen ist keine gänzlich neue Idee und wurde bereits in den 1960er-Jahren zum ersten Mal implementiert (Kavanagh et al. 2017). In den letzten Jahren rückte diese Möglichkeit jedoch wieder vermehrt in den Fokus, da der Fortschritt in immersiven Technologien immer komplexere Simulationen, realitätsnähere Visualisierungen und Interaktionen ermöglicht. Darüber hinaus

finden sich durch die zunehmende Finanzierbarkeit von VR-Anwendungen im Bildungsbereich und das Angebot kostengünstiger hochwertiger HMDs mehr und mehr Forschungsprojekte sowie Literatur zu den Auswirkungen der immersiven VR auf die Bildung (Makransky und Petersen 2021; Goertz, Fehling, und Hagenhofer 2021; für eine Meta-Analyse siehe Wu, Yu, und Gu 2020).

1.1 Potenziale von VR für die Lehre

Die Potenziale von VR für die Hochschullehre sowie die Aus- und Weiterbildung liegen vor allem in der Realisierung logistisch, zeitlich und finanziell schwieriger Aufgaben und Erfahrungen (u. a. Larsen et al. 2012; Çaliskan 2011). Dies betrifft vor allem Lerngelegenheiten, die im Realen zu gefährlich, zu teuer oder nicht erreichbar wären (Schuster 2015). Darüber hinaus bietet die digitale Verfügbarkeit der Lerninhalte Potenziale für die asynchrone und ortsungebundene Nutzung, die eine Wiederholung (Thomas, Metzger, und Niegemann 2018) ermöglichen und zusätzliche Flexibilität schaffen (Zinn 2017).

Zahlreiche Studien über den Einsatz immersiver VR in der Bildung brachten bereits positive Ergebnisse hervor, die auf motivierende Vorteile sowie eine Steigerung des situativen Interesses hinweisen (Makransky, Terkildsen, und Mayer 2019; Mulders 2020; Makransky und Petersen 2019; Makransky und Lilleholt 2018; Makransky, Petersen, und Klingenberg 2020; Muntean und Bogusevski 2019; Chavez und Bayona 2018; Parong und Mayer 2018). Hier kann unter anderem auch der Neuheitseffekt eine Rolle spielen, wobei eine Studie von Huang et al. (2021) herausstellt, dass die Resultate – Förderung von Motivation und Lernen – auch bei steigender Vertrautheit mit dem System nicht abnehmen. Andere Studien weisen auf eine längere Beschäftigung mit der Aufgabe hin und liefern Hinweise auf ein tiefgreifendes Lernen und langfristige Speicherung (Huang, Rauch und Liaw 2010) sowie eine Steigerung des Wissens (Buttussi und Chittaro 2018). Durch ein gewisses Mass an Immersion – sprich das Eintauchen in eine virtuelle Welt z. B. mittels HMD – kann ausserdem ein stärkeres Präsenzerleben sowie mehr Engagement und Selbstwirksamkeit bezüglich des Lernstoffs erlangt werden (Buttussi und Chittaro 2018; Civelek et al. 2014; Han 2020), was wiederum motivierend, ansprechend und lernfördernd auf Lernende wirkt (Huang et al. 2021). Eine Meta-Studie (Wu, Yu, und Gu 2020), welche sich mit dem Vergleich von immersiver VR unter Verwendung von HMDs mit nicht immersiven VR- oder Desktop-Anwendungen und anderen traditionellen Unterrichtsmitteln beschäftigt, bestätigt, dass immersive VR unter Verwendung von HMDs effizienter ist als nicht-immersive Lernansätze (mit geringer Effektgrösse von Cohen's $d = 0.24$). Sowohl der Wissenserwerb als auch die Entwicklung von Fähigkeiten konnten durch das Lernen mittels immersiver VR verbessert sowie der Lerneffekt über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werden.

Williams et al. (2022) fanden heraus, dass die Erwartungen von Studierenden, die in immersiven Virtual-Reality-Laboren lernten, sogar übertroffen wurden und sie über positive affektive Erfahrungen berichteten. Negative Effekte wie erhöhte Aufgabenbelastung (Srivastava et al. 2019), erhöhter extraneous Load¹ (Makransky, Terkildsen, und Mayer 2019; Richards und Taylor 2015) oder erhöhte Motion Sickness² (Srivastava et al. 2019) werden nur in wenigen Studien berichtet.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die wahrgenommene Nutzerfreundlichkeit des Systems, zu welcher unter anderem Pletz und Zinn (2018) einen positiven Zusammenhang in Abhängigkeit von den Vorerfahrungen der Nutzenden feststellten. Mangelnde Nutzerfreundlichkeit wirkt hindernd (Kavanagh et al. 2017). Insgesamt zeigt sich ein signifikanter Vorteil des Einsatzes immersiver VR in der Lehre (Hamilton et al. 2021) und ein hohes Potenzial, diesen noch weiter zu verbessern (Hellriegel und Čubela 2018; Köhler, Münster, und Schlenker 2013; Zender et al. 2018).

1.2 Zielsetzung

Da VR-Implementierungen im Bildungsbereich im Gegensatz zu den Erkenntnissen aus dem vorhergehenden Abschnitt bisher vergleichsweise wenig genutzt werden (Kavanagh et al. 2017), ist der Stand ihrer Entwicklung und Einbindung in die Lehre sowie die Evaluation ihrer Wirksamkeit aktuell nicht zufriedenstellend (Radianti et al. 2020). Die vorliegende Studie verfolgt daher drei Ziele:

1. Konzeption einer virtuellen Lernumgebung, die mit einer sich in Entwicklung befindlichen modularen, offenen und kostenfreien Autorenumgebung (Müser und Fehling 2022) umgesetzt wurde.
2. Untersuchung lehr-lernmethodischer Aspekte der Wirksamkeit – Vergleich einer immersiven VR-Umgebung (VR), einer nicht-immersiven 3D-Desktop-Umgebung (Des) und konventioneller Lernmaterialien.
3. Überprüfung der Benutzerfreundlichkeit der Lernumgebung

Im vorliegenden Beitrag sind sowohl die Erforschung der Wirksamkeit der Lernumgebung – im Sinne einer Überprüfung, ob die neu entwickelte Software den Anforderungen einer multimodalen Anwendung zu Lehr- und Lernzwecken entspricht – als auch die Erfahrungen und das Verhalten der Nutzenden – im Sinne einer Überprüfung, ob die Umsetzung in der neu entwickelten Software optisch ansprechend und die Interaktionsmetaphern praktikabel ist – von Bedeutung.

1 Die Form der kognitiven Belastung, die durch ungünstiges didaktisches Design wichtige Ressourcen bindet (Paas und Sweller 2014).
2 Simulatorkrankheit resultierend aus der Unstimmigkeit zwischen visuell wahrgenommener und realer Bewegung (Brandt 1991).

Es werden erste Ergebnisse einer Pilotstudie vorgestellt, die im Wintersemester 2021/2022 durchgeführt wurde, sowie das Nutzungspotenzial immersiver Lernumgebungen in Hochschulen diskutiert. Hierzu folgt zunächst die Beschreibung virtueller Lernumgebungen sowie des genutzten Lernszenarios. Anschliessend werden die durchgeführte Studie und ihre Ergebnisse dargestellt.

2. Virtuelle Lernumgebungen

Um sowohl nicht-immersive als auch immersive Lehr- und Lernumgebungen zu realisieren und zu nutzen, wird eine Softwareplattform benötigt, die sowohl funktionale Prozesse abbildet, dreidimensionale Visualisierungen ermöglicht, als auch interaktive Metaphern bereitstellt. Funktionale Prozesse können neben den benötigten Grundfunktionalitäten z. B. die Durchführung von Unterrichtseinheiten sein. Ähnlich wie auch am Desktop wird mit einem solchen System mittels Interaktionsmetaphern interagiert. Zu diesen gehören unter anderem Metaphern zur Navigation, Selektion und Manipulation virtueller Objekte sowie die Systemsteuerung (LaViola et al. 2017).

2.1 Implementierung

Zur Umsetzung der Studie wurde eine Softwareplattform auf Basis von Unity Engine (Unity Technologies 2021) verwendet. Lehrende und Lernende können die erstellten Lernumgebungen sowohl in VR mittels HMD (immersives Setting) als auch in einer Desktop-Umgebung (nicht-immersives Setting) betreten, wobei sich die zur Verfügung stehenden Interaktionsmetaphern je nach verwendetem Medium unterscheiden. Interaktionen in VR erscheinen in der Regel direkter und natürlicher (z. B. greifbare Objekte). Darüber hinaus ist unabhängig vom Medium eine Kollaboration aller Nutzenden in der Lernumgebung möglich. Weitere Implementierungsdetails und konzeptionelle Ansätze der verwendeten Softwareplattform werden in Müser und Fehling (2022) vorgestellt.

2.2 Navigations- und Interaktionsmetaphern

Um sich in virtuellen und dreidimensionalen Umgebungen fortzubewegen, wird auf sogenannte Navigationsmetaphern zurückgegriffen. Im Gegensatz zur Navigation mit Tastatur und Maus am Desktop-Computer, die eine kontinuierliche Bewegung gewährleistet, ermöglicht die Teleportation in Virtual Reality eine diskrete und unmittelbare Navigation von Ort zu Ort. Neben der Navigation in virtuellen Räumen ist die Interaktion mit Umgebungen und Objekten in VR wichtig. In der vorliegenden Studie wurden gängige Interaktionsmetaphern eingesetzt, darunter z. B. die

Interaktion mit UI-Elementen, Click-and-Drag-Gesten sowie virtuelle Zeiger, die am Desktop mittels Maus und Tastatur und in VR mittels Raycasting realisiert wurden (LaViola et al. 2017). Alle Interaktionen wurden durch sofortiges visuelles Feedback ergänzt, um die Nutzenden bestmöglich zu unterstützen (Norman 2002).

3. Studiendesign

Zur Evaluation der Anwendbarkeit sowie Wirksamkeit einer virtuellen Lernumgebung wurde eine Lerneinheit entwickelt, welche mit zwei Experimentalgruppen und einer Kontrollgruppe durchgeführt wurde. 28 Mechatronik-Studierende (89% männlich; $M_{\text{Age}} = 22.9$ Jahre, $SD = 2.2$) einer deutschen Hochschule nahmen an der experimentellen Studie teil. Die Teilnehmenden wurden randomisiert den Experimentalgruppen mit Nutzung der virtuellen Lernumgebung mittels HMDs (VR; $N = 10$) oder eines Desktop-Computers (Des; $N = 9$) sowie der Kontrollgruppe mit konventionellem Lernmaterial (KG; $N = 9$) zugewiesen. Die Lerneinheit wurde in zwei aufeinanderfolgenden Durchgängen mit jeweils vier bis fünf Teilnehmenden pro Experimentalgruppe durchgeführt. Die Teilnehmenden der Des- und VR-Gruppe befanden sich gemeinsam in einem Raum. Der leitende Professor nahm einmal als Desktop-Nutzer und einmal als VR-Nutzer teil. Die Kontrollgruppe arbeitete parallel hierzu mit konventionellem Material (Texte, Grafiken und 3D-Modelle; siehe Abbildung 1) zum gleichen Thema in einem Hörsaal. Die Lerneinheit umfasste jeweils etwa 45 Minuten.

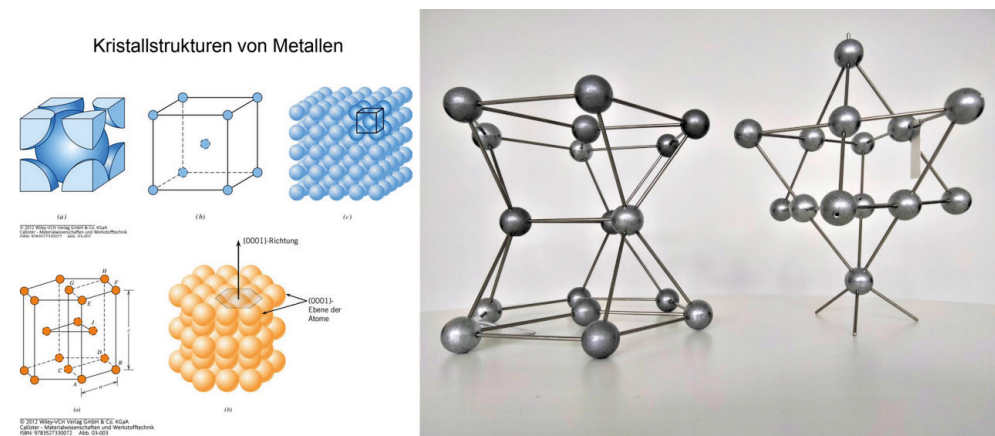


Abb. 1: Die in der Kontrollgruppe verwendeten konventionellen Materialien: zweidimensionale Abbildungen (links; entnommen aus Callister und Rethwisch 2012, 43–44) und dreidimensionale Modelle von Kristallstrukturen (rechts).

Apparatus

Das VR-System bestand aus drei Oculus Quest 2 (OQ2)³ und zwei Oculus Rift and Touch (ORT)⁴ HMDs, den erforderlichen optischen Trackingsystemen und Handcontrollern, über die die Interaktionen (UI-Elemente, VR-Umgebungen, VR-Objekte) per Trigger, Buttons und Analogstick gesteuert wurden. Jeder VR-Nutzende war über ein Kabel mit einem Computer⁵ verbunden und verfügte über eine für Interaktionen und Navigation zur Verfügung stehende Freifläche von ca. 2x2m, in deren Mitte ein Drehstuhl stand. Neben den VR-Lernstationen gab es Desktop-Lernstationen⁶. Die räumliche Anordnung der realen Tische entsprach nicht der räumlichen Anordnung der virtuellen Tische. Neben der nonverbalen Kommunikation in VR war auch eine Kommunikation per Sprache in der realen Welt möglich, auf eine Übertragung per Voice-Chat wurde aufgrund der räumlichen Nähe verzichtet. Während die VR-Nutzenden über den Raum verteilt waren, saßen die Desktop-Nutzenden in einer Reihe nebeneinander. Um die Desktop-Nutzenden nicht abzulenken, wurde darauf geachtet, dass sie die VR-Nutzenden nicht sehen konnten. Der Professor war im ganzen Raum deutlich zu hören.

4. Methodik

Um die Bedingungen und die Wirksamkeit der Lerneinheit zu evaluieren, wurden verschiedene qualitative und quantitative forschungsmethodische Zugänge gewählt. Die Studierenden wurden während der Lerneinheit mithilfe von Fragebögen befragt, nach der Lerneinheit interviewt und ihr Verhalten (z. B. Bewegungsprofile, Blickrichtung) in der virtuellen Umgebung mit Hilfe von Log-Daten protokolliert.

4.1 Material und Instrumente

4.1.1 Fragebogen 1 – Erfassung der Stichprobe

Neben der Beschreibung der Stichprobe diente Fragebogen 1 der Überprüfung der Vergleichbarkeit der randomisiert erstellten Gruppen. Zunächst wurden soziodemografische sowie studienbezogene Informationen abgefragt. Es folgten Fragen zu Vorerfahrungen, früherer Nutzung, Einstellung zu digitalen Medien und VR in Anlehnung an Teile des *Monitors Digitale Bildung* der Bertelsmann Stiftung (2016) sowie den Fragebogen von Niedermeier und Müller-Kreiner (2019). Der Interessenfragebogen basiert auf dem Fragebogen zur Erfassung des individuellen Interesses von

3 Auflösung 2x1832x1920, 90 Hz.

4 Auflösung 2x1080x1200, 90 Hz.

5 GPU: NVIDIA GeForce RTX 3090, CPU: Intel Core i7-6850k/3,60 GHz, RAM: 32 GB, OS: Windows 10 Enterprise.

6 Gleiche Konfiguration wie 5, zusätzlich 2 Displays (Fujitsu P27-8 TS Pro (DP)/Auflösung: 2x2560x1440).

van Vorst (2013). Es wurden Items aus dem Bereich des Fachinteresses übernommen und an die Inhalte der Lehrveranstaltung angepasst. Die daraus resultierenden acht Items ($\alpha = .79$) wurden auf einer vierstufigen Likert-Skala abgefragt. Darüber hinaus enthielt der Teilnehmenden-Fragebogen fünf offene Fragen zum Thema Kristallstruktur, um das themenspezifische Vorwissen der Teilnehmenden zu erfassen.

4.1.2 Fragebogen 2 – Evaluation der Lernumgebung

Zur Messung der Motivation wurde der Fragebogen zur Einschätzung der aktuellen Motivation (FAM; Rheinberg, Vollmeyer und Burns 2001; $\alpha = .79$) verwendet. Er enthielt 13 Aussagen, aufgeteilt auf vier Subskalen (Misserfolgsbefürchtung, Erfolgswahrscheinlichkeit, Interesse und Herausforderung), welche inhaltlich leicht auf die Thematik angepasst wurden und auf einer siebenstufigen Likert-Skala beantwortet werden konnten.

Zur Messung der kognitiven Belastung wurde zum einen der Zwei-Item-Fragebogen von Paas (1992; $\alpha = .78$) eingesetzt, in dem Aufgabenschwierigkeit und mentale Anstrengung von *sehr leicht/niedrig* (= 1) bis *sehr schwer/hoch* (= 9) einzuschätzen sind. Zum anderen wurde ein weiteres Belastungsniveau mithilfe des NASA TLX (Hart 2006; Cronbachs $\alpha = .81$) gemessen, in dem die Arbeitsbelastung in sechs Dimensionen (geistige Anforderung, körperliche Anforderung, zeitliche Anforderung, Leistung, Anstrengung, Frustration) auf einer 7-Punkte-Skala zu bewerten ist. Zur Überprüfung der verschiedenen Formen des cognitive Load wurde ausserdem der naïve rating questionnaire (Klepsch, Schmitz und Seufert 2017; iCL $\alpha = .82$; eCL $\alpha = .71$; gCL $\alpha = .66$) genutzt, auf welchem mittels siebenstufiger Likert-Skala zwei Items zum intrinsic Load sowie jeweils drei Items zum extraneous und germane Load erfragt wurden. Hier war vorrangig der extraneous Load von Interesse.

Zur Messung des Präsenzerlebens wurde die deutsche Version des Fragebogens der Multimodalen Präsenzskala (MPS; Makransky, Lilleholt, und Aaby 2017, deutsche Übersetzung von Volkmann et al. 2018; $\alpha = .96$) verwendet. Die 15 Items sind gleichmässig auf die Subskalen umweltbedingte, soziale und persönliche Präsenz verteilt und wurden auf einer fünfstufigen Likert-Skala beantwortet.

Abschliessend wurden die Studierenden gebeten, ihren Lernerfolg anhand von fünf Items auf einer fünfstufigen Likert Skala selbst einzuschätzen und einige Angaben zur Bewertung des Lernszenarios zu machen. Zu diesem Zweck wurde die Systemnutzbarkeitsskala nach Brook (SUS; 1996; $\alpha = .72$; max. 100 Punkte) verwendet und mithilfe von lernszenariospezifischen Feedbackfragen (z. B. «Die Einführungsphase hat mir geholfen zu verstehen, wie die Ebenen/Atome übereinandergestapelt werden können»; «Ich konnte die Elemente mit geringem Aufwand anordnen») abgerundet. Die Skalen zu Präsenzerleben und Usability wurden ausschliesslich den Experimentalgruppen vorgelegt.

4.1.3 Ergänzende Interviews

Um neben den quantitativen auch qualitative Angaben zur Nutzerfreundlichkeit zu erhalten, wurden im Anschluss an die Lerneinheit zwei kurze Gruppeninterviews durchgeführt. Dabei wurden insgesamt sieben Studierende der VR Gruppe zu ihren Erfahrungen und Einschätzungen befragt. Folgende Themen waren für die Interviewfragen leitend: (1) Behagen und Störgefühle, (2) Schwierigkeit und Funktionalität, (3) Kritik und Wünsche, (4) Nutzbarkeit und Lernerfolg. Der Fokus lag hier vor allem auf der Identifizierung von Verbesserungsmöglichkeiten. Mithilfe von Audioaufnahmen wurden, mit Zustimmung der Teilnehmenden, Transkripte der etwa 5 und 7 Minuten langen Interviews angefertigt.

4.1.4 Log-Daten

Ergänzt wurden diese Erhebungsinstrumente durch systeminhärente Aufzeichnungsmethoden, durch die während des Lernszenarios Daten, z. B. die Position und Blickrichtung des Teilnehmenden, die Verweildauer an einzelnen Lernstationen wie auch die durchgeführten Interaktionen mit Objekten bzw. Aufgaben, erfasst werden konnten. Die Aufzeichnung der Position und Blickrichtung ermöglichte die anschließende Erstellung eines Videos. Das Video gibt die Studie aus der Sicht des Nutzenden wieder. Alle Log-Daten wurden separat von den eingesetzten Fragebogen-Erhebungen ausgewertet. Die Zustimmung zur Erfassung der Log-Daten erteilten die Teilnehmenden mit der Zustimmung zur Teilnahme an der Versuchsreihe.

4.2 Analysen

Die erhobenen quantitativen Daten – Fragebögen und Log-Daten – wurden mittels deskriptiver Statistik sowie Korrelationen analysiert. Darüber hinaus wurden mittels einfaktorieller ANOVA sowie t-Test Gruppenunterschiede herausgearbeitet. Das Signifikanzniveau wurde dabei auf 5% festgelegt.

Die erhobenen qualitativen Daten – Interviews und aus den Log-Daten erstellte Bewegungsprofile – wurden einer evaluativen inhaltlichen Analyse (Kuckartz 2018) unterzogen und kategorisiert. Sie wurden verwendet, um Aspekte der Nutzerfreundlichkeit zu bewerten sowie weitere Gruppenunterschiede festzustellen.

5. Das Lernszenario

5.1 Inhalt

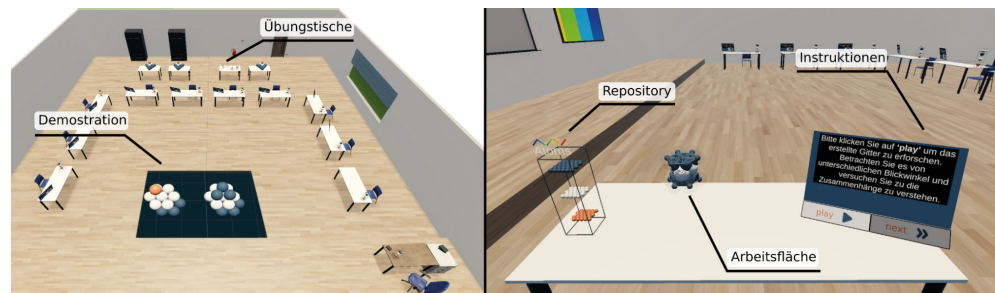


Abb. 2: Visualisierung des VR-Klassenzimmers und die Anordnung der Tische (links); der Aufbau eines Arbeitstisches (rechts).

Das in der Studie verwendete Lernszenario stammt aus dem Bereich der Materialwissenschaften. Darin werden Metalle und ihre kristallinen Strukturen untersucht (siehe Abbildung 1). Der Inhalt wurde von dem für den Kurs verantwortlichen Professor bereitgestellt und aktiv mitgestaltet. Das entstandene VR-Klassenzimmer und der Aufbau eines Arbeitstisches sind in Abbildung 2 dargestellt. Die komplexen kristallinen Strukturen eignen sich sehr gut für den Einsatz in VR (Fogarty et al. 2018). Die Grundstruktur eines Metalls setzt sich aus Atomen zusammen, deren Anordnung im Raum sich periodisch wiederholt. Unterschieden werden kann bei diesen Anordnungen z. B. zwischen kubisch-raumzentrierten und hexagonalen Kugelpackungen, die direkten Einfluss auf die Materialeigenschaften haben. Sie lassen sich mittels konventioneller Lehrmaterialien als räumliche Strukturen aber nur schwer vermitteln.

5.2 Ablauf

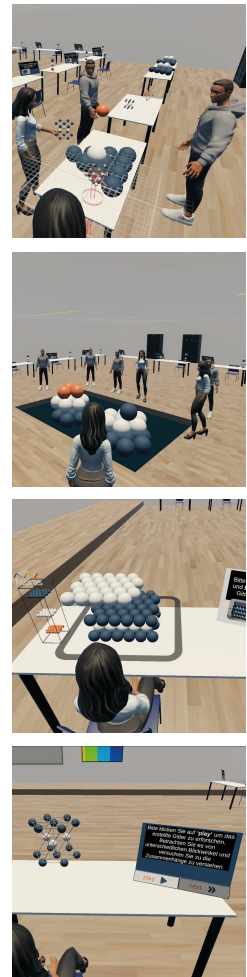
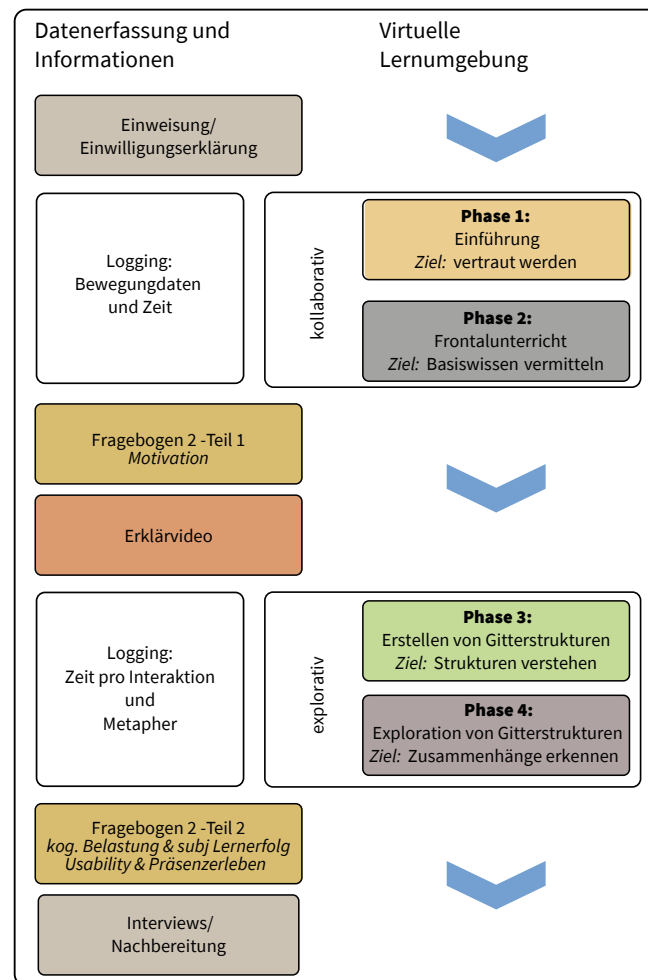


Abb. 3: Ablaufdiagramm der Interventionsstudie.

Der Ablauf der Lerneinheit gliederte sich in der VR- und der Desktop-Umgebung in die gleichen nachfolgend beschriebenen vier aufeinander aufbauenden Phasen (siehe Abbildung 3). Inhaltlich wurde die Interventionsstudie durch den die Vorlesung regulär durchführenden Professor betreut. Technisch unterstützten die Entwickler und Autoren die Lehrperson bei der Intervention. Etwa drei Wochen vor der eigentlichen Unterrichtseinheit bearbeiteten die Studierenden *Fragebogen 1*, welcher vorrangig zur Beschreibung der Stichprobe diente und damit nur indirekt Teil der Intervention war.

Nach einer kurzen Einweisung und der Einwilligungserklärung konnten sich die Studierenden in der Einführungsphase (*Phase 1*) mit der Lernumgebung vertraut machen, um Navigations- und Interaktionsmetaphern kennenzulernen. Darüber hinaus wurden fachrelevante Inhalte (Atome, Elementarzellen und andere Objekte) auf interaktiven Experimentiertischen ausgestellt. Auch die kollaborative Komponente wurde in der Einführungsphase auf spielerische Weise eingeführt, die Objekte auf den Tischen konnten gemeinsam erkundet werden.

In *Phase 2* erläuterte der Professor den Aufbau kristalliner Strukturen durch dichtest gepackte Kugeln anhand vergrößert dargestellter Atome. Unterschiedliche Anordnungen konnten zur Visualisierung verschiedener kristalliner Strukturen genutzt und verglichen werden. Unterstützt wurde dies durch eine weitere Ansicht (Draufsicht), die im virtuellen Klassenzimmer an die Wand projiziert wurde. Mithilfe eines virtuellen Zeigestabs konnte der Dozent auf alle Objekte im Raum zeigen und damit die Aufmerksamkeit der Studierenden lenken.

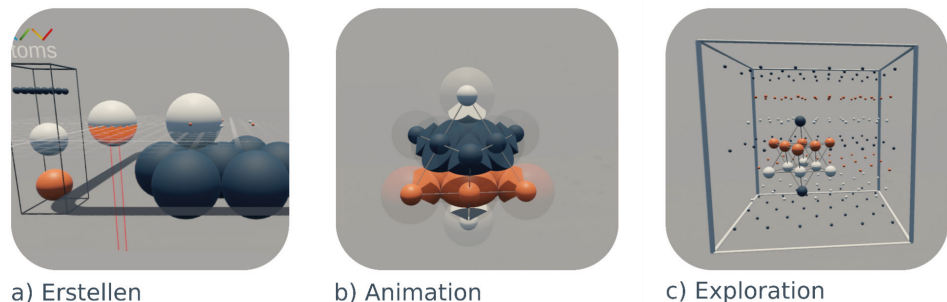


Abb. 4: Die drei virtuellen Erkundungsmethoden: von der Erstellung von Kristallgittern (a) über die Animation verschiedener visueller Repräsentationen (b) bis zu einer räumlichen Interaktion mit der Elementarzelle in einem Gitter (c).

Anschliessend wurde den Studierenden *Fragebogen 2, Teil 1* vorgelegt, welcher die Erfassung der Motivation beinhaltet. Nach einer kurzen Pause, in der der Fragebogen beantwortet wurde, sollten die Lernenden selbstständig zwei dichteste Kugelpackungen als Grundlage für die Kristallstrukturen erstellen (*Phase 3*). Die Aufgabe wurde am virtuellen Arbeitstisch (siehe Abbildung 2) ausgeführt und fand im Unterschied zu den vorangegangenen Phasen in einer nicht-kollaborativen Umgebung statt. Sie umfasste zwei Teilaufgaben: die Erstellung von Ebenen aus einzelnen Atomen und das Stapeln von Ebenen. Atome und Ebenen mussten auf den Arbeitstisch gezogen und an der richtigen Stelle platziert werden, was durch einen Snapping-Mechanismus bestätigt wurde (siehe Abbildung 4a). Ziel war es, die Beziehungen der Atome zueinander und auch die Anordnung der Ebenen untereinander während der Aufgabe kontinuierlich zu explorieren, um ein Verständnis für die entstehende Struktur zu gewinnen.

Eine interaktive Exploration (*Phase 4*) zielte anschliessend darauf ab, die Zusammenhänge zwischen dem Gitter und der Elementarzelle zu erkunden. Die Phase bestand aus zwei Abschnitten: der Animation und der Exploration (siehe Abbildung 4b und 4c). Während der Animation konnten die Studierenden unterschiedliche visuelle Repräsentationen von Elementarzellen und Gittern ineinander überblenden. Hierbei wurde ersichtlich, wie Gitter und Elementarzelle zusammenhängen. In der Exploration sollte gelernt werden, dass eine einzelne Elementarzelle immer auch das gesamte resultierende Gitter beschreibt. Zu diesem Zweck wurde das Gitter halbtransparent dargestellt und die Studierenden wurden aufgefordert, eine Elementarzelle in das halbtransparente Gitter zu ziehen. Auch hier wurde ein Snapping-Mechanismus verwendet, um die Elementarzellen an passenden Stellen im Gitter zu platzieren.

Im Anschluss bearbeiteten die Studierenden *Fragebogen 2, Teil 2*, welcher Fragen zur kognitiven Belastung, zu Präsenzerleben, Usability sowie einer Selbsteinschätzung des eigenen Lernerfolgs beinhaltet. Zusätzlich wurden leitfadengestützte Interviews mit sieben Freiwilligen durchgeführt.

6. Ergebnisse

6.1 Erfahrungen der Nutzenden: Ergebnisse der Fragebögen

Die randomisiert in die drei Gruppen aufgeteilten Studierenden wurden hinsichtlich ihrer Angaben aus Fragebogen 1 geprüft, um eine Vergleichbarkeit der Gruppen sicherzustellen. Dabei konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den drei Gruppen – Experimentalgruppe VR, Des und der Kontrollgruppe – festgestellt werden. Weder hinsichtlich soziodemografischer Angaben noch der Abiturnote ($M=2.38$) oder dem aktuellen Notenschnitt im Studium ($M=2.34$) konnten Unterschiede herausgestellt werden. Auch in Bezug auf das Fachinteresse und das Vorwissen schnitten die Studierendengruppen sehr ähnlich ab, indem sie ein Interesse im mittleren Bereich ($M=2.56$) angaben sowie insgesamt wenig Vorwissen zeigten ($M=1.2$, von max. 6 Punkten). Über alle Gruppen hinweg zeigte sich eine positive Einstellung hinsichtlich digitaler Medien im Allgemeinen ($M=2.61$), wobei die Erfahrung speziell mit VR sowie dessen Bekanntheit und bewerteter Sinnhaftigkeit eher im mittleren Bereich liegen ($M=3.04$). 89.3% der Teilnehmenden gaben an, noch nie eine VR-Anwendung genutzt zu haben, 10.7% nutzen diese bereits in der Freizeit, jedoch nicht zu Lernzwecken. Darüber hinaus gaben 96.4% an, noch nie eine VR-Brille getragen zu haben, 3.6% nutzen diese bereits in der Freizeit, jedoch ebenfalls nicht zu Lernzwecken. Da keine signifikanten Unterschiede in den drei Gruppen hinsichtlich verschiedener persönlicher Aspekte sowie Aspekten der Einstellung

und Vorerfahrungen herausgestellt werden konnten, war es möglich, Gruppenvergleiche hinsichtlich der Angaben aus *Fragebogen 2* zu analysieren. Anders als in *Fragebogen 1* zeigen sich hier deutliche Unterschiede in den Gruppen, die die verschiedenen Interventionen durchlaufen haben. Abbildung 5 zeigt die Unterschiede bezüglich der erhobenen Skalen unter Einbezug der Gruppenzuordnung.

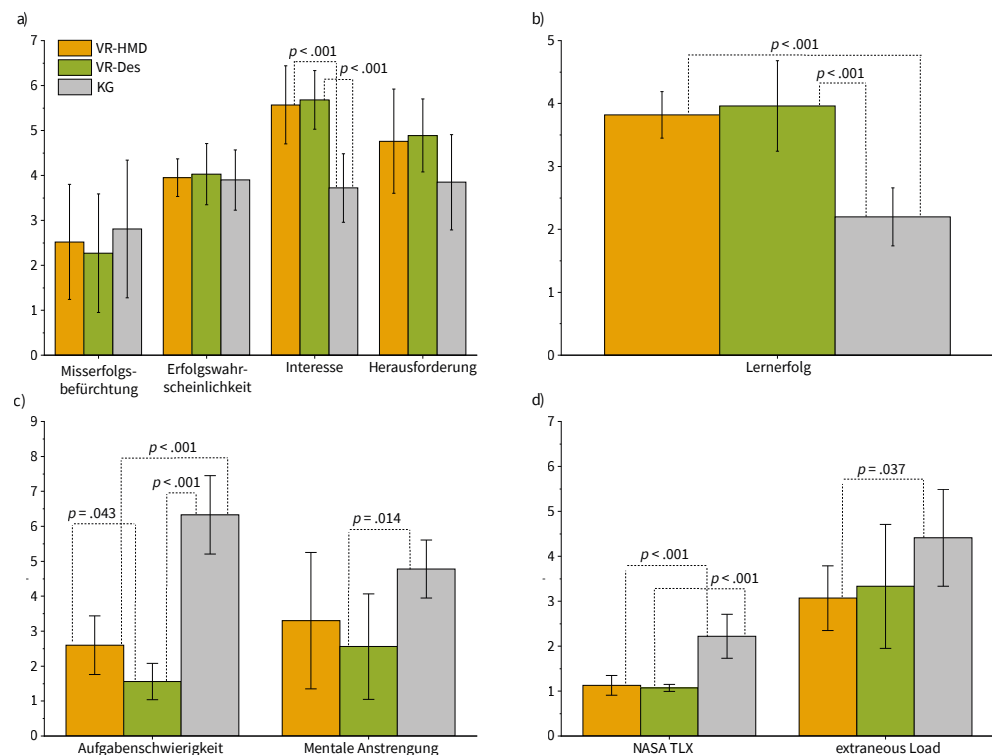


Abb. 5: Ergebnisse der Mittelwertvergleiche (ANOVAS) zwischen den drei Gruppen in (a) den Subskalen des FAM, (b) dem Lernerfolg, (c) den Skalen des cognitive Load nach Paas (1997) sowie (d) dem NASA TLX und der Subskala extraneous Load des naïve rating questionnaire. $N_{VR} = 10$; $N_{Des} = 9$; $N_{KG} = 9/7$ (Lernerfolg); p = Signifikanz.

Es zeigte sich, dass die Kontrollgruppe vor der Durchführung der Lerneinheit – die Experimentalgruppen hatten diesbezüglich bereits Informationen und Erklärungen zum Vorgehen in der Lernumgebung erhalten – signifikant geringer motiviert war als die beiden Experimentalgruppen ($F(2,25) = 18.83$, $p < .001$). Dies schlug sich signifikant jedoch lediglich in der *Subskala* Interesse nieder. Unmittelbar nach der Bearbeitung der Lerninhalte berichtete die Kontrollgruppe eine signifikant höhere kognitive Belastung im Vergleich zu den Experimentalgruppen. Dies zeigte sich zum einen in der Bewertung der Aufgabenschwierigkeit ($F(2,25) = 76.75$, $p < .001$) sowie im NASA Task Load Index ($F(2,25) = 39.12$, $p < .001$). Bezüglich der empfundenen Aufgabenschwierigkeit zeigte sich ebenfalls ein Unterschied zwischen den beiden

Experimentalgruppen, wobei die Gruppe *Des* eine geringere Aufgabenschwierigkeit berichtete als die Gruppe *VR*. In der Bewertung der mentalen Anstrengung hingegen unterschied sich lediglich die Gruppe *Des* signifikant von der Kontrollgruppe. Darüber hinaus zeigte sich, dass die *KG* einen signifikant höheren extraneous Load berichtete als die Gruppe *VR* ($F(2,25) = 3.99, p = .031$). Bezüglich der Bewertung der Aufgaben gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass der Kontrollgruppe methodenbedingt nur ähnliche Aufgaben wie den Experimentalgruppen vorgelegt werden konnten, da diese aufgrund der unterschiedlichen Interaktionsmetaphern nicht identisch sein konnten. Darüber hinaus schätzten die beiden Experimentalgruppen ihren Lernerfolg signifikant höher ein als die Kontrollgruppe ($F(2,23) = 25.21, p < .001$).

Im Vergleich der beiden Experimentalgruppen (siehe Abbildung 6) berichtete die Gruppe *VR* erwartungskonform ein stärkeres Präsenzerleben als die Gruppe *Des*. Sowohl das soziale als auch das umweltbezogene Präsenzerleben wurde von beiden Gruppen moderat bis hoch eingeschätzt und zeigte keine signifikanten Inter-Gruppenunterschiede. Die Gruppe *VR* zeigte allerdings ein signifikant stärkeres persönliches Präsenzerleben ($t(14.26) = 3.39; p = .04$) als die Gruppe *Des*. Die Nutzerfreundlichkeit der implementierten Lernumgebung – gemessen mit der SUS – bewerteten beide Experimentalgruppen als sehr hoch, wobei sich die Werte nicht signifikant unterschieden.

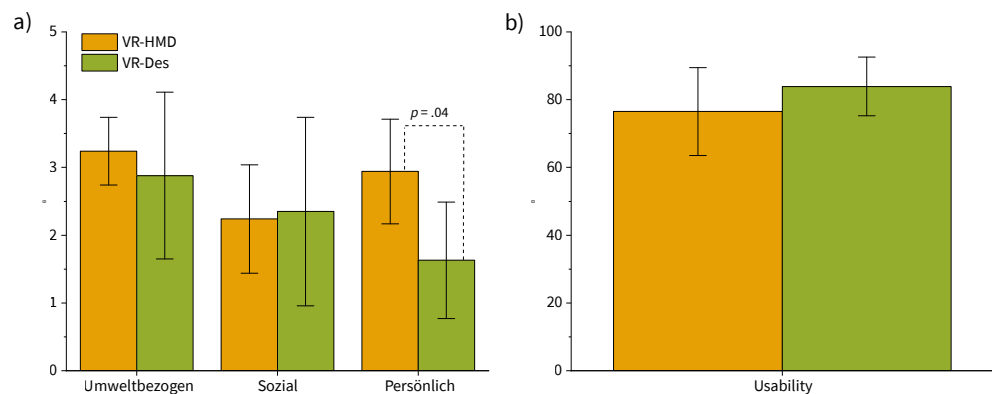


Abb. 6: Ergebnisse der Mittelwertvergleiche (ANOVA) zwischen den zwei Experimentalgruppen in (a) den Subskalen der Multimodalen Präsenzskaala und (b) der SUS. $N_{VR} = 10$; $N_{Des} = 9$; p = Signifikanz.

Bezüglich der spezifisch für die virtuelle Lernumgebung erstellten Feedbackitems konnten positive Bewertungen festgestellt werden. Hier zeigten sich ebenfalls keine Gruppenunterschiede, was eine Vergleichbarkeit der HMD- und Desktop-Nutzung nahelegt.

6.2 Wahrnehmungen der Nutzenden: Ergebnisse der Interviews

Subjektiv bewerteten die VR-Nutzenden die Lerneinheit als gut und nützlich. Sie gaben an, dass die Inhalte und Aufgaben leicht verständlich waren und die Veranschaulichungen in *Phase 2* – mithilfe der vergrößerten und farbig markierten Atome – sehr zum Verständnis der Thematik beigetragen haben.

«Also ich sehe da schon einen Mehrwert, also früher ist mir das sehr schwergefallen, mir das räumlich vorzustellen. Da wurde es zwar auch mit so Kugeln nachgebaut, aber das ist so jetzt schon wesentlich leichter, sich das halt wirklich räumlich vorzustellen, wie das dann ist.» (T2.1)

Von vorrangigem Interesse waren allerdings die Kritiken und Verbesserungsvorschläge der Teilnehmenden. So äusserten Teilnehmende störende Einflüsse, die sich zum einen auf Lernen mit VR im Allgemeinen – wie fehlender Platz und schwer kontrollierbares Verhalten im realen Raum sowie anfängliche Schwierigkeiten im Umgang mit den Controllern – bezogen. Zum anderen wurde aber auch auf hinderliche Merkmale in der Lerneinheit hingewiesen. So wurde die Störung durch andere Teilnehmende oder durch die Platzierung von Gegenständen im Raum bemängelt. Nach der Äusserung einiger Kritikpunkte lieferten die Teilnehmenden konstruktive Verbesserungsvorschläge und äusserten Wünsche, z. B. nach detaillierteren Aufgabenbeschreibungen oder Erläuterungen. Auch wurde der Vorschlag eines anpassbaren Schwierigkeitsniveaus zu Beginn der Lerneinheit vorgebracht, um verschiedene Schwierigkeiten in Abhängigkeit von den Voraussetzungen der Studierenden zu realisieren. Ebenfalls wurden weitere Interaktionsmöglichkeiten, z. B. eine erweiterte Manipulierbarkeit der Kristallgitter (Rotation), als sinnvoll bezeichnet. Darüber hinaus gab es Vorschläge bezüglich der Einbindung weiterer Funktionen, z. B. gender-unabhängiger Avatare, eines kurzen Tutorials zur Nutzung der Controller oder einer Laufbewegung statt der Teleportation. Auch wurden Vorschläge geäussert, die die Selbsteinschätzung des eigenen Lernerfolgs möglicherweise noch gesteigert hätten, wie das Einfügen eines kurzen Verständnistests nach einzelnen Aufgaben. Insgesamt wurden Nutzen und Lernerfolg allerdings als bereits gegeben eingeschätzt und Vorteile gegenüber bisherigen Darstellungsmöglichkeiten der Kristallgitter wurden hervorgehoben:

«Ich denke mal, gerade für Leute, die Probleme haben, sich räumlich etwas vorzustellen, ist es sehr, sehr angenehm und besser zu verstehen, wenn man das wirklich auch so sieht räumlich, anstatt sich nur irgendwie aus einer Abbildung oder einem 3D Bild etwas vorzustellen. Ich denke, dass man damit auch deutlich besser lernen kann.» (T3.2);

Auch Zukunftsvisionen wurden bereits passend thematisiert:

«Wenn ich mir das aber weiter vorstelle, dass man sagt, man sitzt zu Hause und der Professor wäre beispielsweise an der Hochschule und würde uns die Sachen so erklären, fände ich das gar nicht so schlecht, weil sonst würde er vielleicht Modelle mitbringen. Das sieht man dann vielleicht nur in klein. So kann man es wirklich irgendwie empirisch ein bisschen mehr packen und auch dann erforschen [...]. An sich finde ich das, glaube ich, ganz gut. Man bräuchte nur wahrscheinlich mehr Zeit dafür.» (T2.2).

6.3 Verhalten der Nutzenden: Ergebnisse der Log Daten

Die in Abbildung 7 dargestellten acht beispielhaften Bewegungsprofile der beiden Experimentalgruppen (VR und Des) zeigen einen deutlich sichtbaren Unterschied: Während Desktop-Nutzende mehr Orte besuchen und dadurch bedingt seltener länger an einem Ort verweilen, zeigen VR-Nutzende punktuelle Bewegungsprofile.

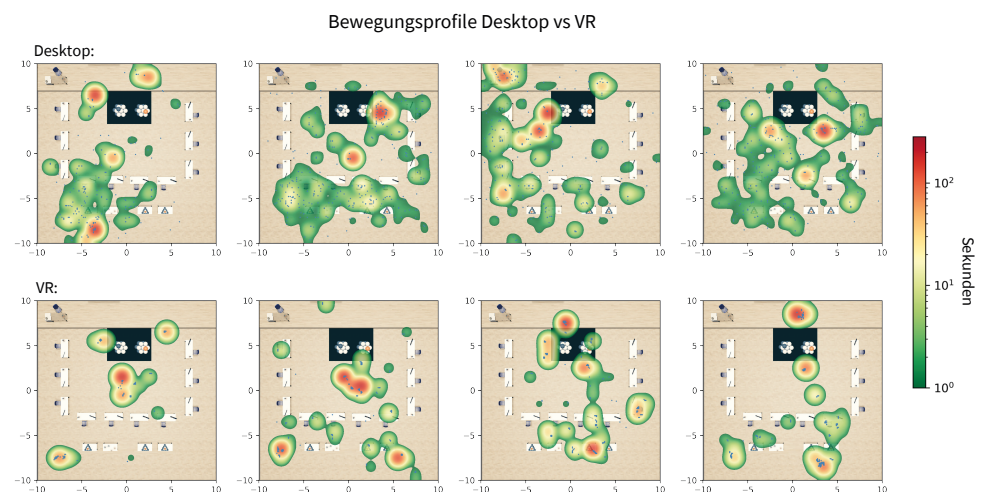


Abb. 7: Aus automatisiert erfassten Log-Daten generierte Bewegungsprofile.

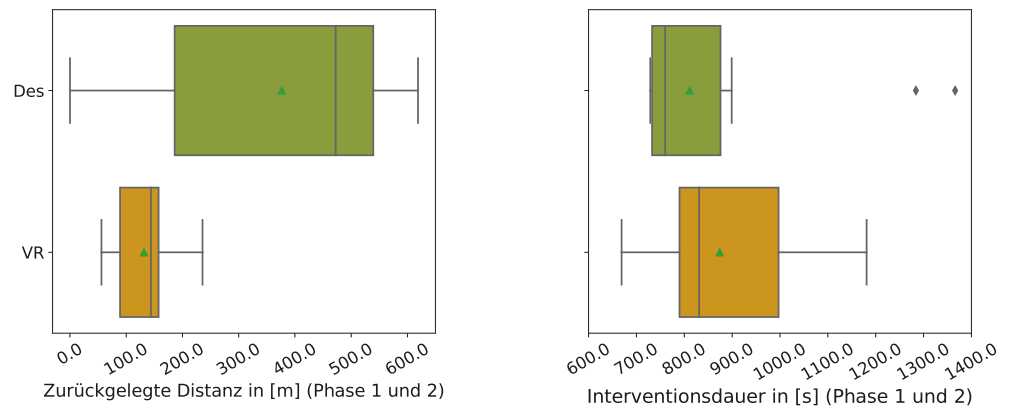


Abb. 8: Analyse der Bewegungsprofile der VR- und Desktop-Nutzenden, hier im Vergleich die zurückgelegte Entfernung (links) sowie die benötigte Zeit (rechts) in den Phasen 1 und 2.

Der t-Test für unabhängige Stichproben ergab für die Bewegungsprofile einen signifikanten Unterschied in der zurückgelegten Entfernung für die *Phasen 1* und *2* (in Metern) für Desktop ($M(SD) = 418.44 (190.15)$) und VR ($M(SD) = 131.72 (52.70)$); $t(17) = 4.58, p < .001$). Bei der benötigten Zeit gab es keinen signifikanten Unterschied ($t(17) = 4.59, p = 0.81$), obwohl Desktop-Nutzende ($M(SD) = 897.0 (249.16)$) etwas mehr Zeit beanspruchten als VR-Nutzende ($M(SD) = 874.0 (165.48)$) (siehe Abbildung 8).

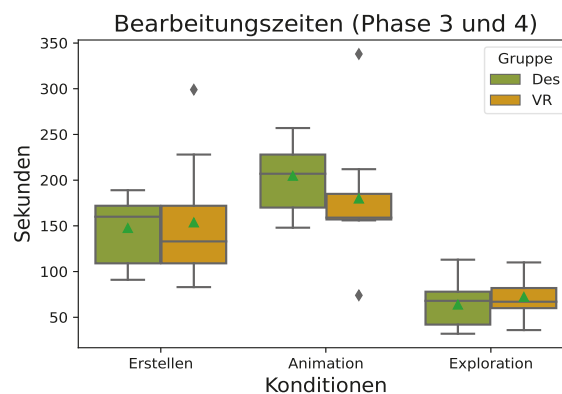


Abb. 9: Die Bearbeitungszeiten der drei Erkundungsmethoden aus den Phasen 3 und 4.

Die Bearbeitungszeiten der beiden Erkundungsphasen sind in Abbildung 9 dargestellt, wobei zwischen Erstellung (*Phase 3*) sowie Animation und räumlicher Exploration (*Phase 4*) unterschieden wird. Auch hier wurde der Unterschied zwischen beiden Experimentalgruppen untersucht. Beim Vergleich aller drei Konditionen gab es keinen signifikanten Unterschied in der benötigten Zeit. Allerdings verbrachten die Desktop-Nutzenden mit den Animationen 14% mehr Zeit ($M(SD) = 204.66 (37.24)$) als die VR-Nutzenden ($M(SD) = 179.77 (70.03)$). Die Mittelwerte der übrigen Bedingungen weisen keine Unterschiede auf (Phase 3: $M(SD)_{Des} = 147.56 (39.34)$; $M(SD)_{VR} = 153.67 (71.21)$; Phase 4: $M(SD)_{Des} = 63.77 (26.43)$; $M(SD)_{VR} = 72.22 (21.68)$). Interessanterweise

ergab sich in der Korrelation zwischen der Bearbeitungszeit (Variable: Erstellen) und dem im Fragebogen abgefragten selbst eingeschätzten Lernerfolg ein signifikanter Unterschied ($r = .47$, $p = .48$; $N = 18$).

7. Diskussion und Ausblick

Die vorliegende Studie hat eine Überprüfung der Konzeption und Wirksamkeit einer virtuellen Lernumgebung in einer Lerneinheit vorgenommen. Ihr lagen drei Ziele zugrunde: (1) Konzeption einer virtuellen Lernumgebung, (2) Erforschung der subjektiven Lernergebnisse und affektiven Wirkung der Lernumgebung und (3) Überprüfung der Benutzerfreundlichkeit und des Verhaltens der Nutzenden in der Lernumgebung.

Es konnte erfolgreich eine virtuelle Lernumgebung geschaffen werden, die ein zuvor festgelegtes Lernszenario zufriedenstellend abbildet und zu Lehr-Lernzwecken eingesetzt werden konnte. Bezüglich des zweiten Ziels konnte die virtuelle Lernumgebung in einer Pilotstudie erfolgreich evaluiert werden. Insgesamt zeigt sich, dass die Kontrollgruppe ihren Lernerfolg als geringer eingeschätzt und eine geringere interessenbasierte Motivation sowie höhere mentale Anstrengung und Aufgabenschwierigkeit bzw. -belastung aufweist als die beiden Experimentalgruppen, die die Lernumgebung mittels HMD (VR), also immersiv, oder Desktop (Des), also nicht-immersiv, nutzten. Ein nicht erwartungskonformer Unterschied zeigte sich lediglich in der Erfassung des extraneous cognitive Load, welcher bei der Kontrollgruppe signifikant höher ausfiel. Bezüglich der Bewertung der Aufgaben gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass der Kontrollgruppe aufgrund der unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Interaktionsmetaphern nur ähnliche, nicht aber identische Aufgaben vorgelegt werden konnten. Zusätzlich gilt es zu beleuchten, dass die implementierte Lernumgebung insgesamt auf wesentliche Elemente reduziert wurde, um möglichst wenige ablenkende Elemente zu integrieren. Analysen der Unterschiede zwischen den beiden Experimentalgruppen VR und Des weisen auf eine grosse Ähnlichkeit der beiden Gruppen hin. Die signifikant geringere Einschätzung der Aufgabenschwierigkeit durch die Gruppe Des lässt sich durch die bekannte und intuitive Interaktion in der Umgebung mithilfe von Tastatur und Maus erklären. Die signifikant höher wahrgenommene persönliche Präsenz in der VR deckt sich mit der Annahme, dass die Nutzung von HMDs den Grad der wahrgenommenen Immersion erhöht. Bezüglich des selbst eingeschätzten Lernerfolgs konnte kein signifikanter Vorteil der Gruppe VR gegenüber Des herausgestellt werden. Die Ergebnisse deuten hier darauf hin, dass weniger die Immersion, sondern mehr die Beschäftigungsdauer mit dem Gegenstand einen positiven Effekt auf den subjektiven Lernerfolg haben kann. Dies kann aus den Vergleichen der Bewegungsprofile und Bearbeitungszeiten interpretiert werden. Die Ergebnisse der Meta-Studie von Wu et al. (2020) konnten

damit nur teilweise reproduziert werden. Eine Analyse des tatsächlichen Wissenserwerbs im Sinne eines Prä-post-Vergleichs mittels Wissenstests wäre hier zukünftig eine geeignete Methode, um auch den objektiven Lernerfolg und damit die Lernwirksamkeit des VR-basierten Lernmaterials mess- und vergleichbar zu machen.

Insgesamt konnten bei den analysierten affektiven und kognitiven Merkmalen erwartungskonforme Unterschiede zwischen den drei Gruppen herausgestellt werden. In einigen Fällen liegen hier allerdings keine signifikanten Ergebnisse vor, was vor allem an der geringen Stichprobengröße sowie an der kurzen Dauer der Intervention liegen kann. Die geringe Stichprobengröße stellt eine Limitation der Studie dar. Nicht nur können kleinere Effekte unerkannt bleiben, auch Ausreisser beeinflussen die Ergebnisse überproportional. Varianzunterschiede zwischen den Gruppen können so im Vergleich zur Varianz über die Gruppengrenzen hinweg überschätzt werden. Zwar wurden durch Fragebogen 1 einige personenbezogene Variablen gemessen und innerhalb der randomisiert zugeteilten Gruppen verglichen, jedoch können weitere Merkmale nicht ausgeschlossen werden, die eine Unterscheidung der Studierenden nahelegen. Dies gilt es bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Aufgrund des hohen Aufwandes, der mit der Umsetzung von Virtual Reality basierten Studien verbunden ist, handelt es sich hier jedoch um eine Stichprobengröße, die vergleichbar mit denen ähnlicher Studien ist. Vor diesem Hintergrund kann auch die hohe Relevanz von Meta-Studien zu diesem Feld betont werden.

Bezüglich der Usability gaben die Studierenden beider Experimentalgruppen in der quantitativen Einschätzung durchweg positives Feedback und stellten auch in den ergänzenden Interviews die Nützlichkeit der verwendeten Lernumgebung heraus. Bezüglich des zweiten Ziels konnten daher erste Hinweise darauf gefunden werden, dass die Umsetzung optisch ansprechend und praktikabel war. Auch die räumliche Situation hat Einfluss auf das Verhalten und die Erfahrung der Nutzenden. Obwohl alle Aufgaben innerhalb der Studie für eine sitzende Nutzung konzipiert waren, wurde die Ausnutzung des real zur Verfügung stehenden Raumes während der Intervention nicht untersagt. Wenige Teilnehmende der Gruppe VR nutzten diese Möglichkeit, konnten so aber unter Umständen Blickwinkel auf die Lerngegenstände einnehmen, die sitzend nicht oder nur schwer möglich gewesen wären. Darüber hinaus befanden sich alle Teilnehmenden während der Studie in einem Raum, was die Durchführung und Beobachtung erheblich erleichterte. Diese räumliche Situation muss bei der Interpretation der Studienergebnisse ebenfalls berücksichtigt werden. Während die Des-Gruppe die Möglichkeit hatte, sich neben der virtuellen auch in der realen Welt umzusehen und miteinander zu sprechen, hatten die Teilnehmer der VR-Gruppe nur die Möglichkeit, miteinander zu sprechen. Beobachtungen während der Studie zeigten, dass die Desktop-Nutzenden diese Kommunikationsebene deutlich häufiger nutzten als die VR-Nutzenden. Die zusätzliche Möglichkeit zur

Kollaboration der Desktop-Nutzenden könnte die Interaktion mit dem System und das Erlernen der Inhalte beeinflusst haben. Die räumliche Situation wirkte sich auch auf den Lehrenden aus, der angab, dass VR besser geeignet sei, um die Erfahrungswelt der Studierenden zu verstehen. Da sich aber alle Studienteilnehmer im selben Raum befanden, wurde die Desktop-Version aufgrund der besseren Übersicht als angenehmere Umgebung empfunden.

Zusätzlich zu den in Abbildung 7 gezeigten Verteilungskarten konnte durch die systeminhärente Aufzeichnung der Position und Blickrichtung die visuelle Wahrnehmung der Nutzenden, sprich das Gesehene, in einem Video aufbereitet werden. Die Analyse der Videos deutet darauf hin, dass es Desktop-Nutzenden leichter fiel, die Navigationsmetaphern zu erlernen als VR-Nutzenden. Das Erlernen der Teleportation dauerte im Vergleich etwas länger, aber einmal erlernt traten keine weiteren Probleme auf. Interessanterweise war die «Neugier» auf andere Avatare in der VR-vergleichsweise höher als in der Desktop-Umgebung, und die VR-Nutzenden schienen sich mehr Zeit zu nehmen, um Lernobjekte genauer zu erkunden. Dies kann auf ein höheres Präsenzerleben zurückgeführt werden, bedarf aber weiterer und detaillierter Verhaltensanalysen beider Gruppen. Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass es Unterschiede in Verhalten und Erleben zwischen *Des* und *VR* gab, aber alle Aufgaben in beiden Gruppen mit den bereitgestellten Interaktionsmetaphern erfolgreich absolviert werden konnten.

Die Ergebnisse dieser Studie stehen in wesentlichen Punkten im Einklang mit vergleichbaren Studien und zeigen einen generellen Nutzen von nicht-immersiven und immersiven Umgebungen für Lehr- und Lernaktivitäten auf. Auch wenn mithilfe dieser Studie keine direkten Aussagen über die Lernwirksamkeit des VR-basierten Lernmaterials geleistet werden kann, zeigen sich seitens der Lernenden doch positive Effekte auf die Motivation, die kognitive Belastung sowie den subjektiven Lernerfolg, welche indirekte Hinweise liefern können. Die untersuchte Lernumgebung (und im Rückschluss die Software, mit der diese erstellt wurde) erfüllen daher grundsätzliche Anforderungen an eine in diesem Kontext sinnvoll einzusetzende Software. Dies kann als Voraussetzung für die weitere Entwicklung dieser Software und der damit verbundenen didaktischen und technischen Konzepte gedeutet werden. Eines der häufigsten Hindernisse der Nutzung von VR zu Lehr- und Lernzwecken ist eine mangelnde Nutzerfreundlichkeit (Kavanagh et al. 2017), weshalb es sinnvoll scheint, bei solchen Weiterentwicklungen einen Fokus auf die selbstständige Bedienung der Software durch Lehrende zu richten. Dazu gehören unter anderem die Gestaltung intuitiver Benutzeroberflächen, qualitativ hochwertige natürliche und direkte Interaktionsmetaphern und leicht wahrnehmbare Informations- und Feedback-Methoden. Darüber hinaus stellten verschiedene Reviews (u. a. Radianti et al. 2020; Luo et al. 2021) heraus, dass bei der Entwicklung, Erforschung und damit auch Nutzung von VR für den Lehr-Lernprozess vor allem wichtig ist, dass sowohl Lerntheorien als

auch ein angepasstes Instruktionsdesign sowie eine effektive Integration der Technologien berücksichtigt werden. Dies kann vor allem durch die Lehrenden selbst geschehen, die den konkreten Lerngegenstand, welcher nun in VR umgesetzt werden soll, bereits lerntheoretisch sowie didaktisch durchdacht und aufbereitet haben.

Autorenwerkzeuge zur Planung, Erstellung und Durchführung VR-basierter Unterrichtsmaterialien sowie deren Integration in bestehende Prozesse der Unterrichtsvorbereitung werden daher zukünftig eine immer grössere Rolle spielen. Ein weiteres Forschungsgebiet ist aus diesem Grund die Untersuchung möglichst geeigneter Methoden zur Inhaltserstellung auf Basis solcher Autorenwerkzeuge, deren softwaretechnische Realisierung und Erprobung mit einem möglichst domänenübergreifenden Pool von Probanden.

Literatur

- Albus, Patrick, Andrea Vogt, und Tina Seufert. 2021. «Signaling in virtual reality influences learning outcome and cognitive load». *Computers & Education* 166: 104154. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2021.104154>.
- Baceviciute, Sarune, Gordon Lucas, Thomas Terkildsen und Guido Makransky. 2021. «Investigating the redundancy principle in immersive virtual reality environments: An eye-tracking and EEG study». *Computer Assisted Learning* 38 (1): 120–36. <https://doi.org/10.1111/jcal.12595>.
- Bertelsmann Stiftung. 2016. *Monitor Digitale Bildung Studierende*. https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/Projekte/Teilhabe_in_einer_digitalisierten_Welt/Fragebogen_Studierende.pdf.
- Brandt, Thomas. 1991. «Motion Sickness». In *Vertigo: Its Multisensory Syndromes*, herausgegeben von Michael Swash, und Thomas Brandt, 311–23. Clinical Medicine and the Nervous System. London: Springer London.
- Brill, Manfred. 2009. *Virtuelle Realität*: Berlin Heidelberg: Springer.
- Brook, John. 1996. «SUS: A «Quick and Dirty» Usability Scale». In *Usability Evaluation in Industry*, herausgegeben von Patrick W. Jordan, B. Thomas, Ian L. McClelland, und Bernard Weerdmeester, 189–94. London: Taylor and Francis.
- Buttussi, Fabio, und Luca Chittaro. 2018. «Effects of Different Types of Virtual Reality Display on Presence and Learning in a Safety Training Scenario». *IEEE transactions on visualization and computer graphics* 24 (2): 1063–76. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2653117>.
- Çalışkan, Onur. 2011. «Virtual field trips in education of earth and environmental sciences». *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 15: 3239–43. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.04.278>.
- Callister, William D., und David G. Rethwisch. 2012. *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik*. Weinheim: Wiley.

- Chavez, Bayron, und Sussy Bayona. 2018. «Virtual Reality in the Learning Process». In *Trends and Advances in Information Systems and Technologies*. Bd. 746, herausgegeben von Álvaro Rocha, Hojjat Adeli, Luís P. Reis und Sandra Costanzo, 1345–56. Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham: Springer International.
- Civelek, Turhan, Erdem Ucar, Hakan Ustunel, und Mehmet Kemal Aydın. 2014. «Effects of a Haptic Augmented Simulation on K-12 Students' Achievement and Their Attitudes Towards Physics». *EURASIA J Math Sci Tech Ed* 10 (6): 565–74. <https://doi.org/10.12973/eurasia.2014.1122a>.
- Cummings, James J., und Jeremy N. Bailenson. 2016. «How Immersive Is Enough? A Meta-Analysis of the Effect of Immersive Technology on User Presence». *Media Psychology* 19 (2): 272–309. <https://doi.org/10.1080/15213269.2015.1015740>.
- Fogarty, J., J. McCormick, und S. El-Tawil. 2018. «Improving student understanding of complex spatial arrangements with virtual reality». *Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice*, 144(2). [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)EI.1943-5541.0000349](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)EI.1943-5541.0000349).
- Goertz, Lutz, Christian Dominic Fehling, und Thomas Hagenhofer. 2021. *Didaktische Konzepte identifizieren – Community of Practice zum Lernen mit AR und VR*. https://www.social-augmented-learning.de/wp-content/downloads/210225-Coplar-Leitfaden_final.pdf.
- Hamilton, D., J. McKechnie, E. Edgerton, und C. Wilson. 2021. «Immersive virtual reality as a pedagogical tool in education: a systematic literature review of quantitative learning outcomes and experimental design». *J. Comput. Educ.* 8 (1): 1–32. <https://doi.org/10.1007/s40692-020-00169-2>.
- Han, Insook. 2020. «Immersive Virtual Field Trips in Education: A Mixed-methods Study on Elementary Students' Presence and Perceived Learning». *Br. J. Educ. Technol.* 51 (2): 420–35. <https://doi.org/10.1111/bjet.12842>.
- Hart, Sandra G. 2006. «Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later». *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 50 (9): 904–8. <https://doi.org/10.1177/154193120605000909>.
- Hellriegel, Jan, und Dino Čubela. 2018. «Das Potenzial von Virtual Reality für den schulischen Unterricht: Eine konstruktivistische Sicht». *MedienPädagogik* 2018 (Occasional Papers): 58–80. <https://doi.org/10.21240/mpaed/00/2018.12.11.X>.
- Huang, Hsiu-Mei, Ulrich Rauch, und Shu-Sheng Liaw. 2010. «Investigating learners' attitudes toward virtual reality learning environments: Based on a constructivist approach». *Computers & Education* 55 (3): 1171–82. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.05.014>.
- Huang, Wen, Rod D. Roscoe, Mina C. Johnson-Glenberg, und Scotty D. Craig. 2021. «Motivation, engagement, and performance across multiple virtual reality sessions and levels of immersion». *Computer Assisted Learning* 37 (3): 745–58. <https://doi.org/10.1111/jcal.12520>.
- Kavanagh, Sam, Andrew Luxton-Reilly, Burkhard Wuensche, und Beryl Plimmer. 2017. «A Systematic Review of Virtual Reality in Education». *Themes in Science and Technology Education* 10 (2): 85–119. <https://eric.ed.gov/?id=EJ1165633>.

- Klepsch, Melina, Florian Schmitz, und Tina Seufert. 2017. «Development and Validation of Two Instruments Measuring Intrinsic, Extraneous, and Germane Cognitive Load». *Frontiers in Psychology* 8: 1997. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01997>.
- Köhler, Thomas, Sander Münster, und Lars Schlenker. 2013. «Didaktik virtueller Realität: Ansätze für eine zielgruppengerechte Gestaltung im Kontext akademischer Bildung». In *Hochschuldidaktik im Zeichen von Heterogenität und Vielfalt: Doppelfestschrift für Peter Baumgartner und Rolf Schulmeister*, herausgegeben von Gabi Reinmann, Martin Ebner und Sandra Schön, 99–112. Norderstedt: Books on Demand.
- Kuckartz, Udo. 2018. *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. Weinheim, Basel: Beltz Juventa.
- Larsen, Christian Ribbjerg, Jeanett Oestergaard, Bent S. Ottesen, und Jette Led Soerensen. 2012. «The Efficacy of Virtual Reality Simulation Training in Laparoscopy: A Systematic Review of Randomized Trials». *Acta obstetrica et gynecologica Scandinavica* 91 (9): 1015–28. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0412.2012.01482.x>.
- LaViola Jr, J.J., E. Kruijff, R.P. McMahan, D. Bowman, und I.P. Poupyrev. 2017. *3D user interfaces: theory and practice*. Boston: Addison-Wesley.
- Luo, Heng, Gege Li, Qinna Feng, Yuqin Yang, und Mingzhang Zuo. 2021. «Virtual reality in K-12 and higher education: A systematic review of the literature from 2000 to 2019». *Computer Assisted Learning* 37 (3): 887–901. <https://doi.org/10.1111/jcal.12538>.
- Macedonia, Manuela. 2019. «Embodied Learning: Why at School the Mind Needs the Body». *Frontiers in psychology* 10: 2098. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02098>.
- Makransky, Guido, und Lau Lilleholt. 2018. «A structural equation modeling investigation of the emotional value of immersive virtual reality in education». *Education Tech Research Dev* 66 (5): 1141–64. <https://doi.org/10.1007/s11423-018-9581-2>.
- Makransky, Guido, Lau Lilleholt, und Anders Aaby. 2017. «Development and validation of the Multimodal Presence Scale for virtual reality environments: A confirmatory factor analysis and item response theory approach». *Computers in Human Behavior* 72:276–85. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.02.066>.
- Makransky, Guido, Gustav Petersen, und Sara Klingenberg. 2020. «Can an immersive virtual reality simulation increase students' interest and career aspirations in science?». *Br. J. Educ. Technol.* 51 (6): 2079–97. <https://doi.org/10.1111/bjet.12954>.
- Makransky, Guido, und Gustav Bøg Petersen. 2019. «Investigating the process of learning with desktop virtual reality: A structural equation modeling approach». *Computers & Education* 134: 15–30. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.02.002>.
- Makransky, Guido, und Gustav Bøg Petersen. 2021. «The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL): a Theoretical Research-Based Model of Learning in Immersive Virtual Reality». *Educ Psychol Rev.* <https://doi.org/10.1007/s10648-020-09586-2>.
- Makransky, Guido, Thomas S. Terkildsen, und Richard E. Mayer. 2019. «Adding immersive virtual reality to a science lab simulation causes more presence but less learning». *Learning and Instruction* 60:225–36. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.12.007>.

- Mayer, Richard E. 2014a. «Cognitive Theory of Multimedia Learning». In *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*, herausgegeben von Richard E. Mayer. Cambridge: Cambridge University Press, 43–71.
- Mayer, Richard E., Hrsg. 2014b. *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Merchant, Zahira, Ernest T. Goetz, Lauren Cifuentes, Wendy Keeney-Kennicutt, und Trina J. Davis. 2014. «Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis». *Computers & Education* 70: 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.07.033>.
- Mulders, Miriam. 2020. «Investigating learners' motivation towards a virtual reality learning environment: a pilot study in vehicle painting». In *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*: 390–93: IEEE. <https://doi.org/10.1109/AIVR50618.2020.00081>.
- Muntean, Christina Hava, und Diana Bogusevski. 2019. *EARTH COURSE Pilot: NEWTON Project Support for STEM Education*. Zugriff am 20. April 2022. http://www.newtonproject.eu/wp-content/uploads/2019/09/Paper_10044_CMuntean_Formatted_CameraReady.pdf.
- Müser, Sinja, und Christian Dominic Fehling. 2022. «AR/VR.nrw – Augmented und Virtual Reality in der Hochschullehre». *HMD* 59 (1): 122–41. <https://doi.org/10.1365/s40702-021-00815-y>.
- Niedermeier, Sandra, und Claudia Müller-Kreiner. 2019. *VR/AR in der Lehre!? Eine Übersichtsstudie zu Zukunftsvisionen des digitalen Lernens aus der Sicht von Studierenden*. <https://doi.org/10.25656/01:18048>.
- Norman, Don A. 2002. *The design of everyday things*. New York: Basic Books.
- Paas, Fred. 1992. «Training strategies for attaining transfer of problem-solving skill in statistics: A cognitive-load approach». *Journal of Educational Psychology* 84 (4): 429–34. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.84.4.429>.
- Paas, Fred, und John Sweller. 2014. «Implications of Cognitive Load Theory for Multimedia Learning». In *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*, herausgegeben von Richard E. Mayer. Cambridge: Cambridge University Press, 27–42.
- Parong, Jocelyn, und Richard E. Mayer. 2018. «Learning science in immersive virtual reality». *Journal of Educational Psychology* 110 (6): 785–97. <https://doi.org/10.1037/edu0000241>.
- Pletz, Carolin, und Bernd Zinn. 2018. «Technologieakzeptanz von virtuellen Lern- und Arbeitsumgebungen in technischen Domänen». *Journal of Technical Education* 6 (4): 86–105. <https://doi.org/10.48513/JOTED.V6I4.143>.
- Radianti, Jaziar, Tim A. Majchrzak, Jennifer Fromm, und Isabell Wohlgenannt. 2020. «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>.
- Reinmann, Gabi. 2013. «Didaktisches Handeln. Die Beziehung zwischen Lerntheorien und Didaktischem Design». In *L3T: Lehrbuch für Lernen und Lehren mit Technologien*, herausgegeben von Martin Ebner. [2. Aufl.], Kap. 12. Berlin: epubli.

- Rheinberg, Falko, Regina Vollmeyer, und Bruce D. Burns. 2001. «FAM: Ein Fragebogen zur Erfassung aktueller Motivation in Lern- und Leistungssituationen». *Diagnostica* 47 (2): 57–66. <https://doi.org/10.1026//0012-1924.47.2.57>.
- Richards, Deborah, und Meredith Taylor. 2015. «A Comparison of learning gains when using a 2D simulation tool versus a 3D virtual world: An experiment to find the right representation involving the Marginal Value Theorem». *Computers & Education* 86: 157–71. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.03.009>.
- Rustemeyer, Dirk. 1999. «Stichwort: Konstruktivismus in der Erziehungswissenschaft». *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft* 2: 467–84. <https://doi.org/10.25656/01:4530>.
- Schuster, Katharina. 2015. *Einfluss natürlicher Benutzerschnittstellen zur Steuerung des Sichtfeldes und der Fortbewegung auf Rezeptionsprozesse in virtuellen Lernumgebungen*. Marburg: Tectum.
- Schwan, Stephan, und Jürgen Buder. 2006. «Virtuelle Realität und E-Learning». Zugriff am 20. April 2022. <https://www.e-teaching.org/didaktik/gestaltung/vr/vr.pdf>.
- Scoresby, Jon, und Brett E. Shelton. 2011. «Visual perspectives within educational computer games: effects on presence and flow within virtual immersive learning environments». *Instr Sci* 39 (3): 227–54. <https://doi.org/10.1007/s11251-010-9126-5>.
- Srivastava, Priyanka, Anurag Rimzhim, Palash Vijay, Shruti Singh, und Sushil Chandra. 2019. «Desktop VR Is Better Than Non-Ambulatory HMD VR for Spatial Learning». *Frontiers in robotics and AI* 6: 50. <https://doi.org/10.3389/frobt.2019.00050>.
- Sweller, John. 2010. «Cognitive Load Theory: Recent Theoretical Advances». In *Cognitive Load Theory*, herausgegeben von Jan L. Plass, Roxana Moreno, und Roland Brunken, 29–47. Cambridge: Cambridge University Press.
- Thomas, Oliver, Dirk Metzger, und Helmut M. Niegemann, Hrsg. 2018. *Digitalisierung in der Aus- und Weiterbildung: Virtual und Augmented Reality für Industrie 4.0*. Berlin: Springer Gabler.
- Unity Technologies. Unity 3D (2021.3.12f1). [Software]. Verfügbar unter <https://unity.com/>.
- van Merriënboer, Jeroen J. G. 2020. «Das Vier-Komponenten Instructional Design (4C/ID) Modell». In *Handbuch Bildungstechnologie*, herausgegeben von Helmut Niegemann und Armin Weinberger, 153–70. Berlin, Heidelberg: Springer.
- van Vorst, Helena. 2013. *Kontextmerkmale und ihr Einfluss auf das Schülerinteresse im Fach Chemie*. Studien zum Physik- und Chemielernen 145. Berlin: Logos. http://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783832596453.
- Vogt, Andrea, Patrick Albus, Michael Montag, Tobias Drey, Sebastian Hartwig, Fulya Tasliarmut, und Mario Wolf. 2021. Effekte von Segmentierung und Color Coding in nicht-immersiven Virtual-Reality-Lernumgebungen. 18. *Fachgruppentagung der Fachgruppe Pädagogische Psychologie (PAEPSY)*: Heidelberg/online, Germany.
- Volkmann, Torben, Daniel Wessel, Nicole Jochems, und Thomas Franke. 2018. „German Translation of the Multimodal Presence Scale.“ In *Mensch und Computer – Tagungsband*, herausgegeben von R. Dachsel und G. Weber: Gesellschaft für Informatik e. V. <https://doi.org/10.18420/muc2018-mci-0428>.

- Williams, Nicholas D., Maria T. Gallardo-Williams, Emily H. Griffith, und Stacey Lowery Bretz. 2022. «Investigating Meaningful Learning in Virtual Reality Organic Chemistry Laboratories». *J. Chem. Educ.* 99 (2): 1100–5. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00476>.
- Wu, Bian, Xiaoxue Yu, und Xiaoqing Gu. 2020. «Effectiveness of immersive virtual reality using head-mounted displays on learning performance: A meta-analysis». *Br. J. Educ. Technol.* 51 (6): 1991–2005. <https://doi.org/10.1111/bjet.13023>.
- Zender, Raphael, Matthias Weise, Markus von der Heyde, und Heinrich Söbke. 2018. «Lehren und Lernen mit VR und AR – Was wird erwartet? Was funktioniert?». In *Proceedings of DeLFI Workshops 2018*, herausgegeben von Daniel Schiffner. http://ceur-ws.org/Vol-2250/WS_VRAR_paper5.pdf.
- Zinn, Bernd. 2017. «Digitalisierung der Arbeit: Kompetenzerwartungen des Beschäftigungssystems und didaktische Implikationen». In *Berufsbildung vor neuen Herausforderungen: Wandel von Arbeit und Wirtschaft*, herausgegeben von Bernhard Bonz, Heinrich Schanz und Jürgen Seifried, 163–76. Berufsbildung konkret Band 13. Baltmannsweiler: Schneider.