

Themenheft Nr. 47:

Immersives Lehren und Lernen mit Augmented und Virtual Reality – Teil 1.

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

Lernen in virtuellen Räumen

Konzeptuelle Grundlagen und Implikationen für künftige Forschung

Christian Hartmann¹  und Maria Bannert¹ 

¹ Technische Universität München

Zusammenfassung

«Immersive Medien bzw. Lernumgebungen» (vgl. «virtual reality») bezeichnen technologiegestützte Anwendungen, die es Lernenden ermöglichen, einen virtuell erzeugten Raum realitätsnah zu erleben. Innerhalb der Lehr-Lern-Forschung wird immersiven Medien das Potenzial zugesprochen, Lernprozesse zu fördern. Jedoch konnten Studien bislang dieses Potenzial nicht hinreichend belegen. Im Rahmen dieses Beitrags argumentieren wir, dass die heterogene Befundlage bisheriger Untersuchungen u. a. durch die Schwierigkeit erklärbar ist, das Lernen mit immersiven Medien theoretisch zu fassen. Wir adressieren diese Schwierigkeit im Rahmen des vorliegenden Beitrags damit, die räumlich-situative Repräsentation episodischer Inhalte als Alleinstellungsmerkmal immersiver Medien herauszuarbeiten. Die Diskussion dieses Alleinstellungsmerkmals hinsichtlich potenzieller Effekte auf das Lernen macht deutlich, dass das Verhältnis zwischen exklusiven Merkmalen immersiver Medien und damit verbundenen Informationsverarbeitungsprozessen bisher nicht hinreichend durch theoretische Modelle erfasst wird. Ziel des vorliegenden Beitrags ist es, durch die Diskussion eines Alleinstellungsmerkmals immersiver Medien theoretische Beziehungen genauer abzubilden, sodass diese in künftigen Forschungsarbeiten besser zielgerichtet adressiert werden können.

Learning in Virtual Reality. Theoretical Foundations And Implications For Future Research

Abstract

Virtual reality learning environments respectively immersive media refer to technology-supported applications which enable learners to experience a virtually generated situation close to reality. Within educational research, immersive media is assumed to promote learning processes. However, studies have not yet been able to provide sufficient evidence of this assumption. We argue that the heterogeneous findings of previous studies can be explained by the difficulty to theoretically describe learning with immersive media. We address this difficulty by arguing that the spatial-situational representation of episodic

content is a unique feature of immersive media. We further argue that the relationship between exclusive features of immersive media and related learning processes has not been adequately addressed by theoretical models so far. The goal of this paper is to map theoretical relationships more precisely by discussing a unique feature of immersive media so that they can be addressed more specifically in future research.

1. Einleitung

Immersive Medien machen Phänomene für Lernende durch virtuell erzeugte Elemente realitätsnah erfahrbar (vgl. «virtual reality»). Lernende können mithilfe immersiver Medien z. B. eine virtuelle Reise durch die Blutbahn des Menschen unternehmen oder durch das Rom der Antike spazieren. Aufgrund umfassender Gestaltungsmöglichkeiten authentischer sowie interaktiver Lernumgebungen werden immersiven Medien im Diskurs der Lehr-Lern-Forschung grosse Potenziale zur Förderung von Lernprozessen zugeschrieben (für eine Übersicht s. Wu, Yu, und Gu 2020). Bisherige Studien liefern jedoch heterogene Befunde hinsichtlich der *Lernförderlichkeit* immersiver Lernumgebungen, d. h., die aktuelle empirische Lage wird dem zugesprochenen Lernpotenzial nicht gerecht: Auch wenn die potentielle Lernförderlichkeit immersiver *Lernumgebungen* in Studien empirisch unterstützt wird (für Metaanalysen, siehe: Merchant u. a. 2014; Zhao u. a. 2020; Wu, Yu, und Gu 2020), gibt es ebenfalls Studien, in denen ausbleibende (oder sogar lernhinderliche) Effekte berichtet werden (z. B. Moreno und Mayer 2002; Parong und Mayer 2018; Makransky, Terkildsen, und Mayer 2019; für eine Metaanalyse, siehe: Kaplan u. a. 2021). Im Rahmen dieses Beitrags argumentieren wir, dass die heterogene Befundlage bisheriger Forschung durch die Schwierigkeit erklärt werden kann, das Lernen in virtueller Realität theoretisch zu greifen, was wiederum die zielgerichtete, theoriegeleitete Operationalisierung von Studien erschwert. Immersive Medien zeichnen sich durch zahlreiche technische Eigenschaften aus, die wiederum potenziell mit einer Vielzahl von Lernmechanismen interagieren. Die zentrale Herausforderung der Forschung zum Lernen mit immersiven Medien besteht darin, Alleinstellungsmerkmale virtueller Lernumgebungen herauszuarbeiten, um so konkrete Wechselwirkungen zwischen Medienmerkmalen und Lernprozessen abbilden zu können. Im Rahmen dieses Beitrags unternehmen wir den Versuch, immersive Medien und deren Potenzial zur Förderung von Lernprozessen theoretisch zu greifen, indem wir zentrale Merkmale immersiver Medien herausarbeiten und darauf aufbauend Implikationen für die künftige Forschung zum Lernen in virtuellen Räumen diskutieren.

2. Unterschied zwischen «immersiven» und «nicht-immersiven» Medien

«Immersive Medien» bezeichnen technologiegestützte Anwendungen, die es Lernenden ermöglichen, einen digital erzeugten Raum realitätsnah zu erleben. Immersion bezeichnet dabei das Gefühl, sich selbst sowie eigene Handlungen in einem digital erzeugten Raum zu verorten (Wirth u. a. 2007). Dieser Effekt immersiver Medien kann potenziell durch zahlreiche Technologiemerkmale erzeugt werden wie z. B. die stereoskopische Wahrnehmung dreidimensionaler Inhalte (für eine Übersicht s. Cummings und Bailenson 2016). Es ist jedoch zu betonen, dass sämtliche Medien *potenziell* immersiv sind, d. h. eine Situation bzw. einen Ort *erfahrbar* machen können. Ein Buch kann durch räumlich-situative Beschreibungen ähnlich immersiv sein wie Visualisierungen in einem Film oder Computerspiel. Als Beispiel eines hochimmersiven Mediums gilt das «head-mounted-display» (HMD): Bei einer Variante erfahren Lernende die digitale Umgebung über einen am Kopf befestigten augennahen Bildschirm. Bewegungen des Kopfes entscheiden über das Sichtfeld, Handlungen werden durch Eingabegeräte in den digitalen Raum überführt. An dieser Stelle zeigt sich, dass Immersion durch mehrere Medienmerkmale erzeugt wird, aus welchen wiederum unterschiedliche Formen von Immersion resultieren. Dede, Jacobson und Richards (2017) unterscheiden zwischen *handlungsbasierter* (z. B. durch eine virtuelle Stadt laufen), *narrativer* (z. B. eine Beschreibung der Stadt lesen), *sensorischer* (z. B. in einem Taxi egoperspektivisch durch eine Stadt fahren) und *sozialer Immersion* (z. B. virtuelle Erfahrung mit mehreren Akteuren). In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass sich die theoretischen Ausführungen unseres Beitrags aufgrund der Komplexität des Forschungsgegenstandes überwiegend auf die visuelle Repräsentation räumlich-situativer Informationen in VR-Lernumgebungen beziehen (sensorische Immersion) und folglich interaktive Handlungen (z. B. die Rotation eines virtuellen Objektes durch Handbewegungen), soziale Interaktionen im virtuellen Raum sowie immersive Narrationen ausklammern. Als «immersiv» bezeichnen wir insbesondere HMD-gestützte Anwendungen. Erfahren Lernende räumlich-situative Stimuli mithilfe eines herkömmlichen Computers oder verbaler Beschreibungen, sprechen wir von «weniger immersiven» Medien. Zudem beziehen sich unsere Ausführungen vorrangig auf Anwendungen, die auf vollständig virtuell erzeugte Repräsentationen zurückgreifen und weniger auf Anwendungen, in welchen die Realität durch virtuelle Elemente angereichert wird (vgl. «augmented reality»).

3. Forschungsmethodische Anmerkungen zur Untersuchung immersiver Lernräume

Ein Problem bisheriger Forschung – wodurch die vorliegende heterogene Befundlage erklärt werden könnte – liegt in der Schwierigkeit, die *besondere* Lernförderlichkeit immersiver Medien theoretisch sowie empirisch herauszuarbeiten. VR-Technologien

ermöglichen die beinahe grenzenlose Gestaltung diverser Lernräume, in denen zudem nahezu alle Sinnesmodalitäten von Lernenden (z. B. durch auditive, visuelle und haptische Reize) je nach Lernziel adressiert werden können. Die daraus resultierende Frage nach der Lernförderlichkeit virtueller Realität gleicht daher in etwa der Frage nach der Bedeutung von Schriftsprache für Lernprozesse: So wie Wörter – scheinbar unbegrenzt vielfältige – Informationen zeichenhaft repräsentieren können, leisten immersive Medien dies auf der Ebene visuell repräsentierter Informationen. Anzumerken ist jedoch, dass dies – zumindest in Teilen – auch für Bildmaterial zutreffend ist. Dies verdeutlicht, dass die Beantwortung der Frage nach der potenziellen Lernförderlichkeit immersiver Medien erfordert, Alleinstellungsmerkmale des Mediums herauszuarbeiten, d. h. zu klären, inwiefern sich immersive von weniger immersiven Medien unterscheiden. Zunächst ist festzustellen, dass ein Medium nicht unmittelbar lernförderlich ist, d. h. *grundsätzlich* eine effektivere Informationsverarbeitung der Lernenden gewährleistet (Clark 1983) als vorherige. Vielmehr scheint es plausibel, dass bestimmte Medienmerkmale spezifische Informationsverarbeitungsprozesse effektiv stützen oder sogar hemmen. Im Rahmen der Lehr-Lern-Forschung wird diese Frage insbesondere im Bereich des multimedialen Lernens (für eine Übersicht s. Mayer 2014 2020) bzw. mediendidaktischer Arbeiten diskutiert (siehe: Buchner und Aretz 2020). Hervorzuheben ist, dass die Forschung zu immersiven Lernmedien zahlreiche wissenschaftliche Disziplinen einschließt (Informatik, Kognitionspsychologie, Medienpädagogik etc.) und daher nur schwer auf wenige Forschungszweige zu begrenzen ist.

In Anlehnung an Mayer (2010) lassen sich zwei übergeordnete Forschungsansätze herausstellen, die der Frage nach der Beziehung zwischen Medien und Lernen nachgehen: Medien- und Instruktororientierte Ansätze. Medienorientierte Ansätze sind eher technologieorientiert und vergleichen unterschiedliche Medien bspw. hinsichtlich ihrer Lernförderlichkeit. Auch wenn medienorientierte Ansätze dabei helfen, Effekte immersiver Medien im Kontrast zu medialen Alternativen herauszuarbeiten, besteht eine Schwierigkeit darin, dass verschiedene Medienmerkmale oftmals zusammengenommen untersucht werden. Dies ist z. B. der Fall, wenn eine HMD-gestützte immersive Lernumgebung mit einer computerbasierten Anwendung verglichen wird, sich beide Anwendungen jedoch hinsichtlich mehrerer Merkmale wie etwa der stereoskopischen Wahrnehmung *und* Interaktionsmöglichkeiten unterscheiden. Differenzierte Effekte spezifischer Merkmale bleiben daher meist verborgen. Medienorientierte Forschungsansätze lassen sich durch Kontrastieren einzelner Medienmerkmale optimieren (vgl. Surry und Ensminger 2001), z. B. indem Merkmale HMD-gestützter Lernumgebungen weitestgehend getrennt voneinander untersucht werden. Ein weiteres Problem medienorientierter Ansätze besteht darin, dass einzelne Merkmale nur in technischer Hinsicht voneinander differenziert werden, d. h. Studien werden meist ohne hinreichende lerntheoretische Bezüge gestaltet.

Instruktionsorientierte Forschungsansätze fokussieren dagegen lerntheoretische Bezüge. Studien zum technologieunterstützten problembasierten Lernen deuten z. B. darauf hin, dass interaktive, problemorientierte sowie authentische Situationen Lernende dabei unterstützen, Zusammenhänge relevanter Lerninhalte besser zu verstehen und diese auf neue Situationen zu transferieren (für eine Übersicht s. Lu, Bridges, und Hmelo-Silver 2014). Da immersive Medien zahlreiche Gestaltungsmöglichkeiten bieten, scheint es naheliegend, bereits etablierte Instruktionmethoden wie etwa das problembasierte Lernen mithilfe von immersiven Medien umzusetzen und zu untersuchen. Ähnlich wie beim medienorientierten Ansatz besteht eine Schwierigkeit des instruktionsorientierten Ansatzes darin, dass verschiedene Aspekte einer Lernsituation oftmals in einer Anwendung zusammengefasst umgesetzt werden, d. h. verschiedene Merkmale der Lernumgebung wie etwa Interaktivität oder Authentizität nicht separat untersucht bzw. experimentell manipuliert werden. Werden potenziell lernförderliche Komponenten einer Lernsituation (z. B. Lernaktivitäten) nicht kontrolliert betrachtet, ist nur schwer bestimmbar, welche genauen Lernprozesse durch immersive Medien gefördert werden. Dies gilt auch für einzelne Medienmerkmale, sofern instruktionsorientierte Ansätze diese nicht getrennt voneinander betrachten.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass die Untersuchung der Lernförderlichkeit immersiver Medien aufgrund der Vermischung sowohl diverser Medienmerkmale als auch zahlreicher lerntheoretischer Bezüge bzw. didaktischer Gestaltungsmöglichkeiten erschwert wird. Auch wenn medien- und instruktionsorientierte Forschungsansätze dabei helfen, Potenziale immersiver Medien zur Förderung von Lernprozessen aufzuzeigen, deuten die stark heterogenen Befunde zur Lernförderlichkeit auf die Notwendigkeit hin, die Beziehung zwischen spezifischen Medienmerkmalen und konkreten Lernprozessen exakter zu beschreiben. Mit anderen Worten stellt sich die Frage nach *Alleinstellungsmerkmalen immersiver Medien*, welche diese in Abgrenzung zu Alternativen als Lernmedien auszeichnen. Im Grunde scheint eine Kombination aus medien- und instruktionsorientierten Ansätzen vielversprechend, sodass einzelne Merkmale und deren exakte Interaktion mit spezifischen Lernprozessen abbildbar werden.

Im folgenden Abschnitt wird zunächst – eher medienorientiert – beschrieben, was immersive Medien auszeichnet. Im Anschluss daran wird – eher instruktionsorientiert – diskutiert, inwiefern diese Medienmerkmale Lernprozesse fördern könnten. Das übergeordnete Ziel besteht darin, Alleinstellungsmerkmale immersiver Lernmedien herauszuarbeiten, um so das Lernen mit immersiven Medien theoretisch greifbar und für eine gezieltere Operationalisierung empirischer Studien nutzbar zu machen.

4. Räumlich-situative Modellierung als Alleinstellungsmerkmal

In einer Metaanalyse untersuchten Cummings und Bailenson (2016) insgesamt 83 Studien mit dem Ziel, die Wirkung immersiver Medien auf die Präsenzwahrnehmung zu spezifizieren. «Wahrgenommene Präsenz» lässt sich vereinfacht als die Empfindung beschreiben, sich an einem Ort, in einem Raum bzw. in einer Situation zu befinden (vgl. Wirth u. a. 2007). Cummings und Bailenson (2016) berücksichtigten Studien, in denen technologische Merkmale immersiver Medien manipuliert wurden, und verstehen Immersion als eine technologische Qualität der Medien, ausgedrückt durch Medieneigenschaften wie etwa die Qualität des Bildes. Ein weiteres Einschlusskriterium für die untersuchten Studien war die Erfassung der wahrgenommenen Präsenz durch Selbstberichte. Die Ergebnisse der Metaanalyse zeigen, dass technologische Merkmale immersiver Medien (z. B. die stereoskopische Wahrnehmung durch HMD-gestützte Anwendungen) – wie in gängigen Definitionen angenommen – eine erhöhte Präsenzwahrnehmung erzeugen. Bei genauerer Betrachtung spezifischer Medienmerkmale stellte sich heraus, dass die wahrgenommene Präsenz am stärksten durch das Ausmass der Freiheitsgrade in einer virtuellen Umgebung (z. B. Bewegungen), die stereoskopische Wahrnehmung visualisierter Elemente (z. B. räumliche Wahrnehmung von Umgebungsdetails) und ein möglichst umfassendes Sichtfeld erzeugt wurde. Die egoperspektivische Wahrnehmung, die Audioqualität sowie die Bildqualität hatten einen geringeren, jedoch ebenfalls bedeutsamen Einfluss. Cummings und Bailenson (2016) sehen durch ihre Befunde das Modell von Wirth u. a. (2007) bestätigt, in dem die medial erzeugte wahrgenommene Präsenz in einem Zweischritt erfolgt: (1) Individuen generieren zunächst ein räumlich-visuelles mentales Modell einer virtuellen Umgebung, aufgrund dessen (2) sie sich in der Umgebung verorten und eigene Handlungen als Folge wahrgenommener Präsenz nicht mehr ihrer realen Umgebung zuordnen.

Aus den bisher angeführten Arbeiten lässt sich ableiten, dass mit der Verwendung immersiver Medien zwei zusammenhängende, jedoch gegeneinander abzugrenzende Mechanismen verbunden sind: der Aufbau eines räumlich-situativen mentalen Modells und das daraus resultierende wahrgenommene Präsenzepfinden. Es wird deutlich, dass ein Alleinstellungsmerkmal immersiver Medien darin besteht, durch Bewegungsmöglichkeiten im virtuellen Raum (z. B. Blick- oder Handbewegungen) die stereoskopische Wahrnehmung sowie ein umfassendes Sichtfeld ein räumlich-situatives Modell extern zu repräsentieren. Räumlich-situative Modelle umfassen Informationen über das «Was», «Wann» und «Wo» (Rinck 2005) und können ebenfalls als (interne sowie externe) Repräsentationen von Situationen oder Episoden bezeichnet werden. Im Gegensatz zu einfachen visuellen Modellen, binden räumlich-situative Modelle mehrere visuelle Darstellungen (Kosslyn, Thompson, und Ganis 2006). Nach Wirth u. a. (2007) kennzeichnen sich räumlich-situative Modelle zudem durch die Selbst-Lokation in einer Situation sowie die Verortung eigener Handlungen

in dieser. Insbesondere durch ein stereoskopisches sowie möglichst weites (egozentriertes) Sichtfeld haben Lernende die Möglichkeit, sich selbst in einer Situation zu verorten. Situationen haben räumliche sowie temporale Merkmale, d. h. sie umfassen Informationen über Grösse, Distanzen, Positionen sowie Bewegungsabläufe von Objekten. Verorten sich Lernende in einer (virtuell-erzeugten) Situation, werden zudem aufgrund möglicher Bewegungsfreiheiten eigene Handlungen in der virtuellen, nicht der «realen» Umgebung verortet.

Für uns ist entscheidend, dass die externe Repräsentation räumlich-situativer Informationen ein Alleinstellungsmerkmal immersiver Medien ist, was wiederum bedeutsame Konsequenzen für die Diskussion der Lernförderlichkeit immersiver Medien hat. Dies lässt sich am Beispiel chemischer Eigenschaften von Molekülen verdeutlichen. Zahlreiche Studien konnten zeigen, dass visuelle Repräsentationen von Molekülen mithilfe von computerbasierten Animationen Lernende dabei unterstützen, komplexe chemische Prozesse nachzuvollziehen (für eine Diskussion, siehe: Falvo 2008). Dieses Lernpotenzial wird auch für das Lernen mit immersiven Medien diskutiert (vgl. Jiménez 2019). Die Frage, die sich in diesem Zusammenhang stellt ist, welchen *Mehrwert* immersive Medien im Vergleich zu bspw. desktopbasierten Simulationen bieten. Der bisherigen Argumentation folgend besteht der essenzielle Unterschied zwischen computerbasierten Animationen und hoch-immersiven Medien darin, räumlich-situative Informationen detaillierter zu repräsentieren. Während Animationen ebenfalls Grösse, Positionen sowie Bewegungen von Molekülen oder Handlungen der Lernenden repräsentieren können, erweitern immersive Medien diese Repräsentation durch eine umfassendere räumliche (sowie körperliche) Einbindung: Grösse, Position, und Bewegungen von Objekten lassen sich durch immersive Medien daher unterschiedlich darstellen bzw. im Fall von eigenen Handlungen räumlich-situativ einbinden. Werden räumlich-situative Modelle extern dargestellt, können Lernende diese Informationen in ein internes (d. h. mentales) Modell überführen. Folglich ist die Lernförderlichkeit immersiver Medien an der Bedeutung der externen Repräsentation räumlich-visueller Modelle für Lernprozesse zu messen.

5. Bedeutung räumlich-situativer Repräsentationen für Lernprozesse

Im aktuellen Forschungsdiskurs wird die potenzielle Lernförderlichkeit immersiver Medien mithilfe zahlreicher theoretischer Ansätze diskutiert (für eine Übersicht s. Suh und Prophet 2018). Basierend auf den bisherigen Ausführungen scheint es vielversprechend, die Lernförderlichkeit immersiver Medien hinsichtlich folgender Fragen zu diskutieren: Wie werden externe Repräsentationen räumlich-situativer Informationen verarbeitet? Welche Vorteile zur Förderung von Lernprozessen entstehen durch die Repräsentation räumlich-situativer Inhalte und unter welchen Voraussetzungen können diese Vorteile räumlich-situativer Repräsentationen nutzbar gemacht

werden? Im Kern lassen sich diese Fragen mit der Annahme der «Situiertheit» von Lernprozessen adressieren, welche postuliert, dass Informationsverarbeitungsprozesse stets in (auch sozial-kulturellen) Situationen eingebettet sind (für eine Übersicht s. Morgan 2017). Hutchins (1995) diskutiert diese Sichtweise am Beispiel von Piloten, die ein Flugzeug steuern: Handlungen wie die Landung sind nicht allein durch individuelle kognitive Prozesse der Piloten (z. B. Gedächtnisfunktionen) erklärbar, sondern erscheinen als Resultat der Interaktion zwischen einer räumlich-situativen Umgebung (z. B. Geschwindigkeitsanzeigen) und kognitiven Verarbeitungsprozessen (z. B. Aufmerksamkeit). Dieser Gedanke zeigt sich ebenfalls in pädagogischen Konzepten, z. B. bei der Lehrmethode der «verankerten Instruktion», welche postuliert, dass Lerninhalte, die in einem anwendungsbezogenen Problemszenario eingebettet sind, effektiver gelernt werden (für eine Übersicht s. Scharnhorst 2001).

Da immersive Medien sich dadurch auszeichnen, räumlich-situative Inhalte extern zu repräsentieren, gewinnt das Verhältnis zwischen der Lernsituation und deren kognitiver Verarbeitung an Bedeutung. Während dieses Verhältnis bereits fester Bestandteil konstruktivistischer Theoriebildung ist (vgl. Gerstenmaier und Mandl 1995), wird es in – eher kognitivistisch orientierten – Theorien multimedialen Lernens (vgl. Mayer 2020; Schnotz 2014) kaum reflektiert. Dies liegt womöglich darin begründet, dass in «klassischen» Szenarien des multimedialen Lernens die Interaktion zwischen individuellen kognitiven Prozessen (z. B. Wissenserwerb) und externen Stimuli der «Umwelt» bisher weniger bedeutsam zur Erklärung der untersuchten Phänomene war. So wurden Prinzipien des multimedialen Lernens ursprünglich anhand der Verwendung (visueller und verbaler) Lernmaterialien untersucht, mit denen Lernende bspw. die Funktionsweise einer Luftpumpe erlernen sollten (vgl. Mayer 2020). In Bezug auf komplexere Repräsentationen wie das Lernen mit Animationen betonen Lowe und Schnotz (2014) bereits, dass Erklärungsansätze multimedialen Lernens um perzeptuelle Verarbeitungsprozesse (bspw. von Bewegungsabläufen) zu erweitern sind. Da immersive Medien das multimediale Lernen um die Erfahrung räumlich-situativer Inhalte erweitern, scheint es für uns vielversprechend, die Idee der Situiertheit in bestehende Theorien zum multimedialen Lernen zu integrieren.

5.1 *Integration episodischer Informationsverarbeitung in bestehende Erklärungsmodelle multimedialen Lernens*

Bisherige Theorien multimedialen Lernens fokussieren überwiegend lexikalisches Wissen, konzeptuelles Wissen, Faktenwissen, Strategiewissen sowie Transferwissen als Lernresultat (vgl. Mayer 2020; Schnotz 2014). Diese Wissensarten können nach Tulving (1972; 1999) der Kategorie des semantischen Wissens zugeordnet werden. Während semantisches Wissen Informationen über die Welt umfasst, werden situative, zeitliche, kontextuelle und räumliche Informationen sowie deren Beziehung

zueinander als episodisches Wissen definiert (Tulving 1992). *Episodisches Wissen* als Resultat multimedialen Lernens wird in der gegenwärtigen Diskussion zur Lernwirksamkeit immersiver Medien bisher nicht hinreichend berücksichtigt (vgl. Makransky und Petersen 2021). Da immersive Medien durch räumlich-situative, d. h. episodische Repräsentationen gekennzeichnet sind, ist zu vermuten, dass Lernprozesse in immersiven Lernumgebungen nicht vollständig durch die Verarbeitung semantischer Informationen erklärt werden können. Folglich scheint es vielversprechend, bestehende Theorien multimedialen Lernens (gerade in Hinblick auf immersive Medien) um den Aspekt der Verarbeitung episodischer Informationen zu ergänzen. Eine solche Anpassung umfasst insbesondere die Frage, inwiefern beide Wissensarten bzw. das semantische sowie das episodische Gedächtnis als Subsysteme des deklarativen Gedächtnisses miteinander interagieren. Die Beziehung zwischen semantischem und episodischem Gedächtnis gilt im Rahmen kognitionspsychologischer Forschung als ungeklärt (für eine Übersicht s. Yee, Chrysiou, und Thompson-Schill 2013), ist jedoch für die Diskussion der Lernförderlichkeit immersiver Medien relevant, da diese sowohl räumlich-situative (d. h. episodische) sowie semantische Informationen abbilden. Der Unterschied zu nicht-immersiven Mediendarstellungen besteht darin, dass räumlich-situative Informationen nicht vollständig extern repräsentiert werden.

Studien zum Textverständnis konnten zeigen, dass Individuen beim Lesen von Texten mit semantischen Informationen ebenfalls räumlich-situative Modelle aufbauen, auch wenn diese Informationen nicht explizit im Text genannt wurden (z. B. Noordzij, Zuidhoek, und Postma 2006; Bestgen und Dupont 2003) und diese Ergänzung das Textverständnis fördern kann (z. B. Gyselinck u. a. 2007). Werden diese räumlich-situativen Modelle mithilfe von immersiven Medien abgebildet, könnten diese den semantischen Wissensaufbau unterstützen, z. B. indem räumlich-situative Repräsentationen semantische Lerninhalte organisieren. Krokos et al. (2019) konnten diesbezüglich zeigen, dass Lernende unterschiedlich angeordnete Positionen und Namen, berühmter – als Bild dargestellter – Charaktere in einer immersiven Umgebung besser erinnerten als Probanden, welchen die identischen Informationen in einer weniger immersiven Umgebung präsentiert wurden. Die Probanden erinnerten zudem mehr Namen der Charaktere (d. h. semantisches Wissen). Basierend auf diesen Befunden liesse sich argumentieren, dass in immersiven Umgebungen repräsentierte episodische (räumlich-situative) Inhalte womöglich den Aufbau semantischen Wissens organisieren. So wäre denkbar, dass die für immersive Lernumgebungen charakteristische (räumlich-situative) Kontextualisierung Lernende dabei unterstützt, bestehende semantische Netzwerke zu aktivieren und aufzubauen. Als Beispiel für diesen Mechanismus dient die Loci-Methode: Lernende die sich eine Reihe von Informationen (z. B. Gegenstände) in einer imaginierten räumlich-situativen Szene vorstellen (z. B. den Weg zur Arbeit), zeigten deutlich bessere Erinnerungsleistungen beim Abruf der Informationen sowie deren Reihenfolge (für eine Metaanalyse,

siehe: Twomey und Kroneisen 2021). Der Unterschied zu immersiven Lernumgebungen besteht darin, dass immersive Medien räumlich-situative Szenen vollständig extern repräsentieren, sodass diese nicht durch die Lernenden selbst imaginiert werden müssen. Inwiefern die externe Repräsentation räumlich-situativer Modelle den Aufbau semantischer Netzwerke unterstützt, wäre – unter Berücksichtigung bestehender Modelle (vgl. Mayer 2020; Schnotz 2014) – ein vielversprechender Ansatz zur Erklärung der Lernförderlichkeit immersiver Medien.

Des Weiteren beziehen sich Theorien multimedialen Lernens (vgl. Mayer 2020; Schnotz 2014) auf die «Theorie dualer Kodierung» von Paivio (1991), die annimmt, dass verbale und visuelle Informationen im Arbeitsgedächtnis in unterschiedlichen Kanälen dual und somit effektiver verarbeitet werden. *Visuelle und verbale Informationen* werden nach Baddeley (2001) zunächst sensorisch erfasst und dann mithilfe der «phonologischen Schleife» und des «visuell-räumlichen Notizblocks» im Arbeitsgedächtnis separat verarbeitet. *Verbale Informationen* werden durch die phonologische Schleife durch eine «innere Stimme» kurzzeitig im Arbeitsgedächtnis gehalten, visuell-räumliche Elemente wie bspw. Objekte werden auf dem Notizblock festgehalten. Aufgrund der Verteilung auf unterschiedliche Verarbeitungskanäle ist es möglich, dass die duale Präsentation visueller und verbaler Informationen zu einer wenig belastenden Verarbeitung im Arbeitsgedächtnis und einer vollständigen Repräsentation im Langzeitgedächtnis führt (vgl. Mayer und Anderson 1992). Dieser Multimedia- bzw. Modalitätseffekt wurde in zahlreichen Studien nachgewiesen (für eine Übersicht s. Mayer 2020) und liesse sich auf immersive Lernumgebungen übertragen. Es gibt jedoch Hinweise, dass räumlich-situative bzw. episodische Informationen nicht im Sinne «dualer Kodierung» verarbeitet werden, sondern mit einer weiteren Komponente assoziiert sind: dem «episodischen Puffer». Nach Baddeley (2001) bildet der episodische Puffer eine Art Bindeglied zwischen der phonologischen Schleife und dem Notizblock, d. h. durch den episodischen Puffer werden verbale und räumlich-visuelle Elemente – womöglich mit Anbindung an das episodische Gedächtnis – in Episoden gebunden, was wiederum die Verarbeitungskapazität der Schleife sowie des Notizblocks erweitert und eine zusätzliche Verbindung zwischen dem Arbeits- und (episodischen) Langzeitgedächtnis offeriert. Auch wenn die genaue Funktionsweise oder Existenz des episodischen Puffers kontrovers diskutiert wird, deutet eine Studie von Plancher et al. (2018) auf Besonderheiten von Verarbeitungsprozessen in immersiven Lernumgebungen hin, die durch die Mitwirkung des episodischen Puffers erklärt werden können. Probanden der Studie navigierten mit einem Auto durch eine virtuelle Stadt und sollten sich möglichst viele Elemente der Umgebung merken. Zudem wurden die Probanden gefragt, in welche Richtung sie nach der Sichtung eines bestimmten Objektes abgebogen sind (vgl. episodisch-kontextuelle Erinnerung). Je nach Bedingungen sollten die Probanden zusätzliche Aufgaben lösen, die mit dem visuell-räumlichen Notizblock oder der phonologischen Schleife assoziiert waren.

Die Ergebnisse zeigen, dass die episodische Erinnerungsleistung in einer immersiven Lernumgebung nicht vollständig durch zusätzliche Aufgaben gehemmt wurde, was Plancher et al. (2018) auf die Mitwirkung des episodischen Puffers als zusätzliche Komponente des Arbeitsgedächtnisses zurückführen. Der episodische Puffer wurden in bisherigen Theorien multimedialen Lernens nicht als Teil der Informationsverarbeitung hervorgehoben, scheinen nach den Befunden von Plancher et al. (2018) jedoch bei der Informationsverarbeitung in immersiven Lernumgebungen entscheidend mitzuwirken.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass Prozesse der Informationsverarbeitung in immersiven Lernumgebungen stark mit dem episodischen Gedächtnis assoziiert sind und diese Besonderheit die Notwendigkeit deutlich macht, bisherige Ansätze multimedialen Lernens (insb. in immersiven Lernumgebungen) auf dieses auszurichten. Dabei wäre es lohnenswert, die Beziehung zwischen räumlich-situativen bzw. episodischen und semantischen Repräsentationen in immersiven Lernumgebungen trennschärfer zu fassen um zu verstehen, inwiefern die gesonderte Einbindung des episodischen Gedächtnisses die Verarbeitung semantischer Informationen unterstützt und umgekehrt. Dieser Aspekt ist in bisherigen Erklärungsansätzen multimedialen Lernens unterrepräsentiert (vgl. Mayer 2020; Schnotz 2014), wäre jedoch zur Erklärung immersiver Lernumgebungen vielversprechend. Eine erste Möglichkeit der Einbindung in bestehende Modelle multimedialen Lernens bestünde darin, das Verhältnis zwischen räumlich-situativen und semantischen Informationen hinsichtlich inhaltlicher Kohäsion genauer zu analysieren, d. h. zu hinterfragen, in welcher Beziehung der räumlich-situative (episodische) Kontext mit verbal präsentierten, semantischen Lerninhalten steht.

5.2 Inhaltliche Kohärenzbildung zwischen räumlich-situativen und semantischen Repräsentationen

In einer Studie mit fünf- bis siebenjährigen Kindern untersuchten Sipe und Pathman (2021) die Beziehung zwischen dem semantischen und episodischen Gedächtnis. Die Kinder führten während der Studie verschiedene Aktivitäten aus, die entweder zum jeweiligen räumlich-situativen Kontext passten (z. B. das Sortieren von Post in einer Postfiliale) oder mit diesem nicht in Beziehung standen (z. B. das Sortieren von Post in einem Lebensmittelgeschäft). Die Befunde zeigen, dass die Erinnerungsleistung räumlich-situativer, d. h. episodischer Merkmale besser war, wenn die Kinder eine zum Kontext passende Aktivität ausführten. Sipe und Pathman (2021) betonen auf Grundlage der Ergebnisse, dass die «Passung» bzw. Kohärenz semantischer und episodischer Merkmale einer Situation die Lernleistung positiv beeinflusst, da relevante Informationen so elaborierter in Gedächtnisstrukturen eingebettet werden. An dieser Stelle wird deutlich, dass die Lernförderlichkeit immersiver Medien im Sinne

einer kombinierten Darstellung und Verarbeitung semantischer und räumlich-situativer Inhalte vermutlich davon abhängt, wie kohärent Lernumgebung und Lerninhalt sind. Diese Annahme entspricht dem von Mayer (2020) formulierten *Kohärenzprinzip*: Multimediales Lernen ist effektiver, wenn unnötige Details visueller oder verbaler Darstellungen vermieden werden («seductive details»). Im Umkehrschluss bedeutet das, ausschliesslich essenzielle Informationen genutzter Darstellungen einzuschliessen. Besteht keine (kohärente) Beziehung zwischen multiplen Repräsentationen, so sind sie nicht essenziell. Wie sich inhaltliche Kohärenz bestimmen lässt bzw. wie sie von Lernenden geformt wird, bleibt im Rahmen der Forschung zum multimedialen Lernen bisher eher vage (Brünken, Seufert, und Zander 2005) – vermutlich auch, da inhaltliche Kohärenz stark davon abhängt, welche Lernziele für eine medial gestützte Lernsituation definiert werden.

Bestünde in einer immersiven Lernsituation das Lernziel darin, externe räumlich-situative Repräsentationen möglichst detailgetreu zu erinnern, liesse sich von einer grossen inhaltlichen Kohärenz sprechen. Sollen Studierende der Kunstgeschichte bspw. die Bauweise einer (virtuellen) Kathedrale erlernen, ist eine (immersive) Darstellung räumlich-situativer Informationen (ggf. ergänzt um verbale Beschreibungen) mit dem Lernziel vereinbar und somit kohärent zum Lerngegenstand. Ähnlich verhält es sich, wenn angehende Lehrkräfte z. B. zuvor erlernte Unterrichtsstrategien in einem (immersiv-virtuellen) Klassenzimmer anwenden sollen. Auch wenn die Funktion der immersiven Lernumgebung – anders als bei der Kathedrale – nicht darin besteht, räumlich-situative Inhalte möglichst detailgetreu zu erinnern, besteht die inhaltliche Kohärenz insbesondere in der Darbietung eines realitätsnahen Anwendungskontextes für zuvor erlernte Inhalte, die womöglich aufgrund des episodischen Charakters immersiver Lernumgebungen die Transferleistung in reale Situationen fördert (zur Übersicht s. Bossard u. a. 2008). Die inhaltliche Kohärenz ist jedoch weniger offensichtlich, wenn verbal repräsentierte semantische Inhalte in eine immersive Lernumgebung eingebettet werden, Semantik und virtuelle Umgebung jedoch nicht gleichzusetzen sind und die Umgebung über einen Anwendungskontext hinausgeht. Als Beispiel für dieses Szenario eignet sich eine virtuelle Lernumgebung, die in einer Studie von Parong und Mayer (2018) verwendet wurde, in der sich keine Vorteile der immersiven Lernumgebung gegenüber einer Kontrollbedingung mit Bildmaterial zeigten: Die Probanden bekamen in der immersiven Lernumgebung die Möglichkeit, sich mithilfe eines «Raumschiffs» in einem menschlichen Körper zu bewegen und so etwas über Zellen zu lernen. Eigenschaften und Funktionen der Zellen wurden durch eingeblendete schriftliche Benennungen sowie auditive Beschreibungen erläutert. Während die inhaltliche Kohärenz zwischen den verbalen Beschreibungen und den visualisierten Zellen vorhanden war, stellte sich jedoch die Frage, welche Bedeutung «der Körper» – der räumlich-situative Kontext der immersiven Lernumgebung – innehatte, da es sich dabei eher um einen animierten Hintergrund ohne deutlichen Bezug

für das Lernziel handelte. Auch wenn die inhaltliche Kohärenz der zuvor beschriebenen Lernsituation an dieser Stelle nicht hinreichend beurteilt werden kann, deutet sich an, dass räumlich-situative (episodische) Repräsentationen nicht notwendigerweise inhaltlich kohärent zu semantischen Elementen der immersiven Lernumgebung sind. Die Frage nach inhaltlicher Kohärenz besitzt folglich für die Diskussion der Lernförderlichkeit immersiver Lernumgebungen eine grosse Relevanz.

Ein geeigneter Ansatz um die inhaltliche Kohärenz zwischen (räumlich-situativen) visuellen und verbalen Repräsentationen näher zu spezifizieren ist das «DeFT» (design, function, task) Modell von Ainsworth (2014), in dem zwischen drei Funktionen multipler Repräsentationen unterschieden wird: Ergänzung, Reduktion und Konstruktion. «Ergänzung» bedeutet, dass verschiedene Darstellungen unterschiedliche, einander ergänzende Informationen innerhalb eines Konzepts repräsentieren. Beispielsweise liessen sich Dimensionen einer Kathedrale in ihren Abmessungen beschreiben und zeitgleich dimensional mithilfe immersiver Medien abbilden. «Reduktion» bedeutet, dass eine Repräsentation einen einfacheren Zugang zu einer komplexeren Repräsentation desselben Konzepts ermöglicht. Die komplexe Architektur einer Kathedrale ist bspw. einfacher zugänglich als deren verbale Beschreibungen. «Konstruktion» bedeutet, dass beide Repräsentationen zwar unterschiedliche Konzepte repräsentieren, die beidseitige Integration der Konzepte jedoch zu einem besseren Verständnis führt. Die Wirkung von z. B. Wandgemälden einer Kathedrale sowie deren detailgetreue dimensionale Darstellung unterstützen womöglich das Verständnis von Bemalungstechniken (z. B. Schattierungen) sowie Herausforderungen bei der Bemalung (z. B. Erreichbarkeit). Zusammengenommen zeigt sich, dass die potenzielle Lernförderlichkeit immersiver Medien durch inhaltliche Kohärenz zwischen räumlich-situativen und semantischen Repräsentationen bestimmt werden kann.

5.3 *Imagination und Vorstellungsvermögen*

Eine weitere wichtige Forschungsfrage zum Potenzial der Lernförderlichkeit immersiver Medien ist, inwiefern Lernende in der Lage sind, sich räumlich-situative Informationen mental vorzustellen, ohne diese Informationen in einer immersiven Lernumgebung visuell wahrgenommen zu haben. Dieser Aspekt lässt sich mit dem «Buchproblem» beschreiben (vgl. Turner 2014): Wie kann es sein, dass die Detailgenauigkeit virtuell erzeugter Realitäten von einer Geschichte, d. h. einer verbalen Repräsentation übertroffen werden kann? So ist es z. B. leicht vorstellbar, dass sich Lesende der Harry-Potter-Romane – scheinbar mühelos – in die räumliche Situation des Zauberlehrlings hineinversetzen können, ohne diese in virtuellen Realitäten zu erleben. Demnach ist anzunehmen, dass das Potenzial immersiver Medien durch die Fähigkeit der Lernenden moderiert wird, sich die dargestellten Inhalte vorzustellen.

Die Studie von Safadel und White (2020) konnte einen derartigen Effekt für das Lernen mit immersiven Medien nachweisen. Probanden mit einem geringen Vorstellungsvermögen erinnerten räumliche Details in einer immersiven Lernumgebung besser als diejenigen mit einer höheren Vorstellungskraft. Dieser Effekt kehrte sich jedoch um, wenn ihnen die identischen Inhalte in einer weniger immersiven Umgebung dargeboten wurden. Diese Befunde machen deutlich, dass Individuen mit hinreichendem Vorstellungsvermögen in der Lage sind, räumlich-situative Repräsentationen selbst zu imaginieren. Demnach kann die Präsentation visueller Repräsentationen, die in weniger immersiven Lernumgebungen nicht oder nur in Teilen dargestellt werden, womöglich durch interne kognitive Prozesse wie bspw. Imagination kompensiert werden.

6. Fazit

In diesem Beitrag haben wir den Versuch unternommen, ein Alleinstellungsmerkmal immersiver Medien herauszuarbeiten, um in einem nächsten Schritt zu diskutieren, inwiefern dieses Merkmal das Potenzial immersiver Medien als wirksames Lernmedium identifiziert. Unserer Argumentation folgend, besteht ein Alleinstellungsmerkmal immersiver Medien darin, räumlich-situative bzw. episodische Informationen innerhalb einer virtuellen Umgebung darzustellen. Es wurde anhand vorliegender Forschung gezeigt, dass diese Darstellung (1) mit räumlich-situativen (d. h. episodischen) Informationsverarbeitungsprozessen assoziiert ist, (2) je nach Lernziel unterschiedlich kohärent zu nicht-räumlich-situativen Repräsentationen sein kann und (3) Lernende ebenfalls in der Lage sind, sich räumlich-situative Repräsentationen ohne Darbietung vorzustellen. Diese drei übergeordneten Aspekte haben Implikationen für die Beantwortung der Frage, welches Potenzial immersive Medien für die Förderung von Lernprozessen haben, die richtungsweisend für die weitere Forschung sind und den erfolgreichen Einsatz von VR beim Lernen bestimmen. Diese Implikationen lassen sich in folgenden Leitfragen zusammenfassen:

- Welche Medienmerkmale charakterisiert die immersive Lernumgebung und lassen sich die Inhalte mit vergleichbaren «traditionellen» Medien darstellen? Worin bestehen die essenziellen Unterschiede der medialen Darstellung?
- Welche räumlich-situativen episodischen Inhalte werden in einer immersiven Lernumgebung dargestellt und was für ein mentales Modell bilden Lernende von diesen Inhalten?
- Welche semantischen Informationen werden den Lernenden zusätzlich dargeboten und in welcher Modalität (z. B. verbal oder visuell) werden diese präsentiert?
- Was sind die Lernziele der immersiven Lernumgebung? In welchem Verhältnis stehen die in der immersiven Lernumgebung dargestellten Repräsentationen? Wie kohärent sind die räumlich-situativen und semantischen Informationen?

Wodurch zeichnet sich die Kohärenz aus und inwiefern unterstützt die gemeinsame Darstellung das zuvor definierte Lernziel?

- Sind Lernende in der Lage, sich die räumlich-situativen Merkmale einer immersiven Lernumgebung vorzustellen? Falls nicht, welche Vorteile ergeben sich durch die externe Repräsentation räumlich-situativer Inhalte?

Diese Leitfragen bieten Anknüpfungspunkte zur Erklärung der zum Teil widersprüchlichen Befundlage zum Lernen mit immersiven Medien (siehe die eingangs erwähnte Befundlage) und bieten zudem Orientierungshilfen für künftige Forschung sowie die praktische Nutzung immersiver Medien in diversen Lehr-Lernkontexten. Diesbezüglich lassen sich folgende Annahmen formulieren:

- Immersive Medien zeichnen sich durch die externe Repräsentation räumlich situativer bzw. episodischer Informationen aus. Im Vergleich zu rein bildlichen oder verbalen Darstellungen besteht ein Alleinstellungsmerkmal immersiver Medien darin, bildliche sowie verbale Informationen einer Situation vollständig abzubilden. Lernende können so räumlich-situative (d. h. episodische) Stimuli – ohne diese zu imaginieren – unmittelbar wahrnehmen.
- Diese Repräsentationen können von Lernenden in Form eines mentalen Modells internalisiert werden. Derartige mentale Modelle bilden – neben dem Gefühl räumlich-situativer Präsenz – das kognitive Resultat immersiver Lernumgebungen und sollten in künftigen Studien erfasst werden.
- Die Verarbeitung und Erinnerung räumlich-situativer episodischer Informationen unterscheidet sich von der Verarbeitung semantischer Informationen. Da Lernziele immersiver Lernumgebungen meist das Erlernen von sowohl semantischen als auch episodischen Informationen beinhalten, ist die Betrachtung des Wechselspiels beider Wissensformen zur Klärung des Lernpotenzials immersiver Medien essenziell. Das Wechselspiel beider Wissensformen äussert sich zudem über die inhaltliche Kohärenzbildung, also die Frage, inwiefern durch immersive Medien dargestellte räumlich-situative Merkmale der Umgebung mit semantischen Lerninhalten zusammenhängen und gemeinsam ein kohärentes mentales Modell bilden. Auch hier liegt der Unterschied immersiver Medien zu rein bildlichen und verbalen Darstellungen in der Präsentation räumlich-situativer bzw. episodischer Merkmale einer virtuellen Umgebung.
- Das Lernpotenzial immersiver Medien wird vermutlich über das Vorstellungsvermögen der Lernenden moderiert. Sind Lernende in der Lage sich räumlich-situative Inhalte auch ohne Repräsentation vorzustellen, wäre davon auszugehen, dass eine externe Repräsentation mit keinen zusätzlichen Lerneffekten verbunden ist.

Abschliessend möchten wir darauf hinweisen, dass unser Beitrag die Visualisierung räumlich-situativer Inhalte und die darauf bezogenen Lernaktivitäten fokussiert. Affektive Erklärungsansätze sowie handlungsbezogene Merkmale immersiver Lernumgebungen blieben aufgrund der umfassenden Komplexität unseres Fokus ausgeklammert, sollten aber in der weiteren Forschung ebenfalls theoriegeleitet ausdifferenziert werden, um das innovative Forschungsfeld zum Lernen in virtuellen Realitäten voranzubringen. Hierfür soll der vorliegende Beitrag einen Anhaltspunkt bieten.

Literatur

- Ainsworth, Shaaron. 2014. «The multiple representations principle in multimedia learning». In *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*, herausgegeben von Richard Mayer, 2. Aufl., 464–86. Santa Barbara: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.024>.
- Baddeley, Alan. 2001. «The Concept of Episodic Memory». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, September. <https://doi.org/10.1098/rstb.2001.0957>.
- Bestgen, Yves, und Vincent Dupont. 2003. «The construction of spatial situation models during reading». *Psychological Research* 67 (3): 209–18. <https://doi.org/10.1007/s00426-002-0111-8>.
- Bossard, Cyril, Gilles Kermarrec, Cédric Buche, und Jacques Tisseau. 2008. «Transfer of Learning in Virtual Environments: A New Challenge?» *Virtual Reality* 12 (3): 151–61. <https://doi.org/10.1007/s10055-008-0093-y>.
- Brünken, Roland, Tina Seufert, und Steffi Zander. 2005. «Förderung Der Kohärenzbildung Beim Lernen Mit Multiplen Repräsentationen: Fostering Coherence Formation in Learning with Multiple Representations». *Zeitschrift Für Pädagogische Psychologie* 19 (1/2): 61–75. <https://doi.org/10.1024/1010-0652.19.12.61>.
- Buchner, Josef, und Diane Aretz. 2020. «Lernen mit immersiver Virtual Reality: Didaktisches Design und Lessons Learned». Herausgegeben von Klaus Rummel, Ilka Koppel, Sandra Aßmann, Patrick Bettinger, und Karsten D. Wolf. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung, Jahrbuch Medienpädagogik*, 17 (Jahrbuch Medienpädagogik): 195–216. <https://doi.org/10.21240/mpaed/jb17/2020.05.01.X>.
- Clark, Richard. 1983. «Reconsidering Research on Learning from Media». *Review of Educational Research* 53 (Dezember). <https://doi.org/10.3102/00346543053004445>.
- 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>.

- Dede, Christopher J., Jeffrey Jacobson, und John Richards. 2017. «Introduction: Virtual, Augmented, and Mixed Realities in Education». In *Virtual, Augmented, and Mixed Realities in Education*, herausgegeben von Dejian Liu, Chris Dede, Ronghuai Huang, und John Richards, 1–16. Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5490-7_1.
- Falvo, David A. 2008. «Animations and Simulations for Teaching and Learning Molecular Chemistry». *International Journal of Technology in Teaching and Learning* 4 (1): 68–77. https://sicitet.org/main/wp-content/uploads/2016/11/ijttl-08-01-4_1_5_Falvo.pdf.
- Gerstenmaier, Jochen, und Heinz Mandl. 1995. «Wissenserwerb unter konstruktivistischer Perspektive». *Zeitschrift für Pädagogik* 41 (6): 868–88. <https://doi.org/10.25656/01:10534>.
- Gyselinc, Valérie, Rossana Beni, Francesca Pazzaglia, Chiara Meneghetti, und Amandine Mondoloni. 2007. «Working Memory Components and Imagery Instructions in the Elaboration of a Spatial Mental Model». *Psychological Research* 71 (3): 373–82. <https://doi.org/10.1007/s00426-006-0091-1>.
- Hutchins, Edwin. 1995. «How a Cockpit Remembers Its Speeds». *Cognitive Science* 19 (3): 265–88. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1903_1.
- Jiménez, Zulma A. 2019. «Teaching and Learning Chemistry via Augmented and Immersive Virtual Reality». In *ACS Symposium Series*, herausgegeben von Tanya Gupta und Robert E. Belford, 1318:31–52. Washington, DC: American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-2019-1318.ch003>.
- Kaplan, Alexandra D., Jessica Cruit, Mica Endsley, Suzanne M. Beers, Ben D. Sawyer, und P. A. Hancock. 2021. «The Effects of Virtual Reality, Augmented Reality, and Mixed Reality as Training Enhancement Methods: A Meta-Analysis». *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 63 (4): 706–26. <https://doi.org/10.1177/0018720820904229>.
- Kosslyn, Stephen, William Thompson, und Giorgio Ganis. 2006. *The Case for Mental Imagery*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195179088.001.0001>.
- Krokos, Eric, Catherine Plaisant, und Amitabh Varshney. 2019. «Virtual Memory Palaces: Immersion Aids Recall». *Virtual Reality* 23 (1): 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10055-018-0346-3>.
- Lowe, Richard K., und Wolfgang Schnotz. 2014. «Animation Principles in Multimedia Learning». In *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*, herausgegeben von Richard Mayer, 2. Aufl., 513–46. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.026>.
- Lu, Jingyan, Susan Bridges, und Cindy E. Hmelo-Silver. 2014. «Problem-Based Learning». In *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences*, herausgegeben von R. Keith Sawyer, 2. Aufl., 298–318. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139519526.019>.
- Makransky, Guido, und Gustav B. Petersen. 2021. «The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL): A Theoretical Research-Based Model of Learning in Immersive Virtual Reality». *Educational Psychology Review*, Januar. <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 (April): 225–36. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.12.007>.
- Mayer, Richard. 2020. *Multimedia Learning*. 3. Aufl. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316941355>.
- Mayer, Richard E. 2010. «Applying the Science of Learning to Medical Education: Applying the Science of Learning». *Medical Education* 44 (6): 543–49. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.2010.03624.x>.
- Mayer, Richard E., Hrsg. 2014. *The Cambridge handbook of multimedia learning*. Second Edition. Cambridge Handbooks in Psychology. New York: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369>.
- Mayer, Richard E., und Richard B. Anderson. 1992. «The Instructive Animation: Helping Students Build Connections between Words and Pictures in Multimedia Learning.» *Journal of Educational Psychology* 84 (4): 444–52. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.84.4.444>.
- 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 (Januar): 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.07.033>.
- Moreno, Roxana, und Richard E. Mayer. 2002. «Learning science in virtual reality multimedia environments: Role of methods and media». *Journal of Educational Psychology* 94 (3): 598–610. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.94.3.598>.
- Noordzij, Matthijs L., Sander Zuidhoek, und Albert Postma. 2006. «The Influence of Visual Experience on the Ability to Form Spatial Mental Models Based on Route and Survey Descriptions». *Cognition* 100 (2): 321–42. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2005.05.006>.
- Paivio, Allan. 1991. «Dual Coding Theory: Retrospect and Current Status.» *Canadian Journal of Psychology/Revue Canadienne de Psychologie* 45 (3): 255–87. <https://doi.org/10.1037/h0084295>.
- 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>.
- Plancher, Gaën, Valérie Gyselinck, und Pascale Piolino. 2018. «The Integration of Realistic Episodic Memories Relies on Different Working Memory Processes: Evidence from Virtual Navigation». *Frontiers in Psychology* 9 (47): 1–10. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00047>.
- Rinck, Mike. 2005. «Spatial Situation Models». In *The Cambridge Handbook of Visuospatial Thinking*, herausgegeben von Priti Shah und Akira Miyake, 1. Aufl., 334–82. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511610448.010>.
- Safadel, Parviz, und David White. 2020. «Effectiveness of Computer-Generated Virtual Reality (VR) in Learning and Teaching Environments with Spatial Frameworks». *Applied Sciences* 10 (16): 5438. <https://doi.org/10.3390/app10165438>.
- Scharnhorst, Ursula. 2001. «Anchored Instruction: Situiertes Lernen in multimedialen Lernumgebungen». *Swiss Journal of Educational Research* 23 (3): 471–92. <https://doi.org/10.24452/sjer.23.3.4615>.

- Schnotz, Wolfgang. 2014. «Integrated Model of Text and Picture Comprehension». In *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning*, herausgegeben von Richard Mayer, 2. Aufl., 72–103. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547369.006>.
- Sipe, Sarah J., und Thanujeni Pathman. 2021. «Memory at Play: Examining Relations Between Episodic and Semantic Memory in a Children’s Museum». *Child Development* 92 (3). <https://doi.org/10.1111/cdev.13484>.
- Suh, Ayoung, und Jane Prophet. 2018. «The State of Immersive Technology Research: A Literature Analysis». *Computers in Human Behavior* 86 (September): 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.04.019>.
- Surry, Daniel W., und David Ensminger. 2001. «What’s Wrong with Media Comparison Studies?». *Educational Technology* 41 (4): 32–35.
- Tulving, E. 1992. «MEMORY SYSTEMS AND THE BRAIN». *Clinical Neuropharmacology* 15 (Part A): 63–214.
- Tulving, Endel. 1972. «Episodic and Semantic Memory». In *Organization of Memory*, herausgegeben von Endel Tulving und Wayne Donaldson, 381–403. New York: Academic Press.
- Tulving, Endel. 1999. «On the uniqueness of episodic memory». In *Cognitive neuroscience of memory*, 11–42. Ashland: Hogrefe & Huber.
- Turner, Phil. 2014. «The “Book Problem” and Its Neural Correlates». *AI & SOCIETY* 29 (4): 497–505. <https://doi.org/10.1007/s00146-013-0491-x>.
- Twomey, Conal, und Meike Kroneisen. 2021. «The Effectiveness of the Loci Method as a Mnemonic Device: Meta-Analysis». *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 74 (8): 1317–26. <https://doi.org/10.1177/1747021821993457>.
- Wirth, Werner, Tilo Hartmann, Saskia Böcking, Peter Vorderer, Christoph Klimmt, Holger Schramm, Timo Saari, u. a. 2007. «A Process Model of the Formation of Spatial Presence Experiences». *Media Psychology* 9 (Mai): 493–525. <https://doi.org/10.1080/15213260701283079>.
- Wu, Bian, Xiaoxue Yu, und Xiaoqing Gu. 2020. «Effectiveness of Immersive Virtual Reality Using Head-mounted Displays on Learning Performance: A Meta-analysis». *British Journal of Educational Technology* 51 (6): 1991–2005. <https://doi.org/10.1111/bjet.13023>.
- Yee, Eiling, Evangelia G Chrysikou, und Sharon L Thompson-Schill. 2013. «The Cognitive Neuroscience of Semantic Memory». In *Oxford Handbook of Cognitive Neuroscience*, herausgegeben von Kevin Ochsner und Stephen Kosslyn, 1–16. Oxford; New York: Oxford University Press. https://www.psychologie.uni-freiburg.de/Members/kiesel/Publications/YeeChrysikouThompsonSchill_SemMemChapInPress.pdf.
- Zhao, Jingjie, Xinliang Xu, Hualin Jiang, und Yi Ding. 2020. «The Effectiveness of Virtual Reality-Based Technology on Anatomy Teaching: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Studies». *BMC Medical Education* 20 (1): 127. <https://doi.org/10.1186/s12909-020-1994-z>.