

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

Augmented Reality in der Hochschullehre Überlegungen zu einer zukunftsweisenden Ausbildung von Lehrpersonen

Corinne Wyss¹ , Florian Furrer² , Adrian Degonda²  und Wolfgang Bühler² 

¹ Pädagogische Hochschule FHNW

² Pädagogische Hochschule Zürich

Zusammenfassung

Augmented Reality (AR) ist eine Technologie zur Ergänzung und Überlagerung der realen Welt mit virtuellen Informationen. Hierzu stehen verschiedene Technologien zur Verfügung. Zu diesen zählen nebst Smartphones auch Smartbrillen, Head-Mounted Displays und weitere Geräte. In den letzten Jahren erfuhr AR im Bildungsbereich vermehrt Beachtung. Obwohl die Anzahl an Projekten und Publikationen hierzu inzwischen immens gestiegen ist, bestehen immer noch Forschungslücken in Bezug auf generelle didaktische Aspekte von AR im Unterricht sowie zur Lehrpersonenbildung. Dies ist ein bedeutendes Defizit, da Lehrpersonen der entscheidende Faktor für eine hochgradige Integration digitaler Medien in den schulischen Unterricht darstellen und damit die Digitalisierung der Volksschule konkret beeinflussen. Der Beitrag widmet sich deshalb diesem Thema und beschäftigt sich mit dem Lehren und Lernen mit AR-Anwendungen im Rahmen der Lehrpersonenbildung. Es wird vorerst eine Begriffsklärung sowie ein Überblick über die zentralen Erkenntnisse zu AR im Bildungsbereich erarbeitet und erläutert, welches Potenzial und welche Herausforderungen der Technologie zugeschrieben werden. Darauf aufbauend werden didaktische Überlegungen und konkrete Bildungsziele für den Einsatz von AR in der Lehrpersonenbildung dargelegt. Der Beitrag soll damit eine anregende Grundlage bieten, um den Einsatz von AR in der Lehrpersonenbildung zu reflektieren und weiterzuentwickeln.

Augmented Reality in Higher Education. Considerations for a Future-Oriented Teacher Education

Abstract

Augmented Reality (AR) is a technology that supplements and overlays the real world with virtual information. Various technologies are available for this purpose. These include smartphones, smart glasses, head-mounted displays, and other devices. In



recent years, AR has received increased attention in the field of education. Although the number of projects and publications has increased considerably, there are still research gaps regarding didactic aspects of AR in teaching in general and in the field of teacher education. This is a crucial shortcoming, as teachers are the decisive factor for a high level of integration of digital media into school teaching and thus have a substantial influence on the digitisation of public schools. This article is therefore dedicated to this topic and deals with teaching and learning with AR applications in the context of teacher education. Initially, a clarification of concepts and an overview of the central findings on AR in education will be provided and the potential and challenges attributed to the technology will be outlined. Building on this, didactic considerations and concrete educational goals for the use of AR in teacher education are illustrated. The article is intended to provide a stimulating basis for reflecting on and further developing the use of AR in teacher education.

1. Einleitung

Die Digitalisierung hat in verschiedenen Bereichen unseres Alltags bereits zu massgeblichen Veränderungen geführt. Auch im Bildungsbereich wird digitalen Medien seit vielen Jahren grosses Veränderungspotenzial für Schule und Unterricht zugesprochen. Bereits seit den 1960er-Jahren sind Entwicklungen rund um computerbasiertes Lernen erkennbar, die Massnahmen intensivierten sich mit der Einführung des PCs Anfang der 1980er-Jahre (Eickelmann 2018) und äussern sich aktuell in einer zunehmenden Nutzung von digitalen Ressourcen (EDUCA 2021; Hartong 2019) sowie dem Nachdenken über den Einsatz von neuartigen Technologien wie Augmented Reality (Buchner 2017; Steppuhn 2019). Während die digitalen Geräte anfänglich primär als Instruktionsmaschinen betrachtet wurden, werden sie seit Mitte der 1980er-Jahre vermehrt als «cognitive tools» wahrgenommen, welche die Kommunikation unterstützen sowie kreative und schülerorientierte Lehr- und Lernprozesse ermöglichen können (Petko et al. 2017). Da die Bereitstellung hierfür notwendiger Geräte und Softwarelösungen zumeist mit erheblichen Initialkosten verbunden ist, hat die Bildungspolitik über unterschiedliche Initiativen und enorme Reform- und Finanzierungsprogramme versucht, die Digitalisierung von Schulen voranzutreiben. Nebst der Ausstattung von Bildungseinrichtungen mit der notwendigen Hard- und Software wurden entsprechende Massnahmen auf der Ebene des Bildungssystems (z. B. finanzielle Ressourcen, Aus- und Weiterbildungsangebote, bildungspolitische Vorgaben, Anpassung der Curricula) getroffen (Hartong 2019; Petko und Döbeli Honegger 2011; Petko, Döbeli Honegger, und Prasse 2018; Eickelmann 2018).

Obschon die Erfüllung dieser Grundbedingungen eine zentrale Voraussetzung für die Integration digitaler Technologien im Unterricht darstellt, fällt der Lehrperson eine wesentliche Funktion zu. Verschiedene Studien konnten zeigen, dass

insbesondere eine positive Einstellung der Lehrperson zum unterrichtsbezogenen Einsatz digitaler Medien sowie gute Fähigkeiten im Umgang mit der Technik und deren didaktischen Einsatzmöglichkeiten von Bedeutung sind (Petko und Döbeli Honegger 2011). Hier nimmt die Lehrpersonenbildung eine zentrale Rolle ein. Im Studium sollten angehende Lehrpersonen neben dem Erwerb medienbezogener Fähigkeiten auch die Möglichkeit erhalten, bisherige Medienerfahrungen zu reflektieren, neue eigene Lernerfahrungen zu sammeln und im Rahmen der berufspraktischen Ausbildung zu erproben (Petko, Döbeli Honegger, und Prasse 2018). Augmented Reality stellt hierbei ein besonders interessantes Lehr- und Lernmedium dar, da bisherige Arbeiten diverse Vorzüge dieser Technologie aufzeigen konnten, deren Verbreitung und Etablierung in den Schulen jedoch noch in der Anfangsphase begriffen ist (Kljun, Geroimenko, und Čopič Pucihar 2020).

Basierend auf diesen Erkenntnissen beschäftigt sich dieser Beitrag mit dem Lehren und Lernen mit AR-Anwendungen im Rahmen der Lehrpersonenbildung. Zunächst wird der Begriff bzw. die Technologie definiert und ein Überblick über die Entwicklung von AR-Technologien im Bildungskontext gewährt. Anschliessend werden die zentralen Erkenntnisse zu AR im Bildungsbereich dargestellt und wird erläutert, welches Potenzial und welche Herausforderungen der Technologie zugeschrieben werden. Anhand von didaktischen Überlegungen soll aufgezeigt werden, inwiefern Lernszenarien durch AR bereichert werden können, und schliesslich werden konkrete Bildungsziele für den Einsatz von AR in der Lehrpersonenbildung dargelegt. Der Beitrag verfolgt damit das Ziel, eine anregende Grundlage zu schaffen, um den Einsatz von AR in der Lehrpersonenbildung zu reflektieren.

2. Zur Definition und Begriffsbestimmung von AR

Augmented Reality (AR) bezeichnet eine direkte oder indirekte Ansicht einer physischen, realen Umgebung, die durch Hinzufügen virtueller computergenerierter Informationen erweitert wurde. AR ist interaktiv und in 3D erfassbar und kombiniert reale und virtuelle Objekte. Während Virtual Reality den Benutzer vollständig in eine synthetische Welt eintaucht, ohne dass dieser die reale Welt noch sehen kann, erweitert Augmented Reality-Technologie den Realitätssinn, indem sie virtuelle Objekte und Hinweise (Text, Audio, Bilder, Video, 3D-Objekte) auf die reale Welt in Echtzeit überlagert (Tzima, Styliaras, und Bassounas 2019; Bower et al. 2014; Kesim und Ozarlan 2012). Diese hybride Welt lässt sich in den meisten Fällen durch Interaktion räumlich erkunden und manipulieren (Peddie 2017). AR verbessert die Wahrnehmung und Interaktion des Benutzers mit der realen Welt und zielt darauf, dessen Leben zu vereinfachen, indem sie virtuelle Informationen nicht nur in seine unmittelbare Umgebung, sondern auch in jede indirekte Sicht auf die reale Umgebung bringt (Carmigniani und Furht 2011).

Zur visuellen Verdeutlichung der unterschiedlichen Konzepte wird häufig auf das Milgram Reality-Virtuality Continuum zurückgegriffen (siehe Abbildung 1). Die Skala reicht von einer völlig realen Umgebung (Realität) hin zu einer vollständig virtuellen Umgebung (Virtualität). Innerhalb dieses Kontinuums wird der Raum zwischen realer Umgebung und virtueller Umgebung als Mixed Reality (MR) bezeichnet. MR ist als eine Umgebung zu definieren, in der sich reale Welt und virtuelle Welt vermischen. Wie aus Abbildung 1 ersichtlich wird, besteht MR aus zwei Hauptelementen: auf der einen Seite Augmented Reality (AR) und auf der anderen Augmented Virtuality (AV). AR ist eine Kombination aus realen und virtuellen Objekten und enthält eine kleinere Menge an virtuellen Daten, während AV ein Konzept ist, bei dem Elemente der Realität in eine virtuelle Umgebung integriert werden und mehr digitale Daten enthält (Nincarean et al. 2013).

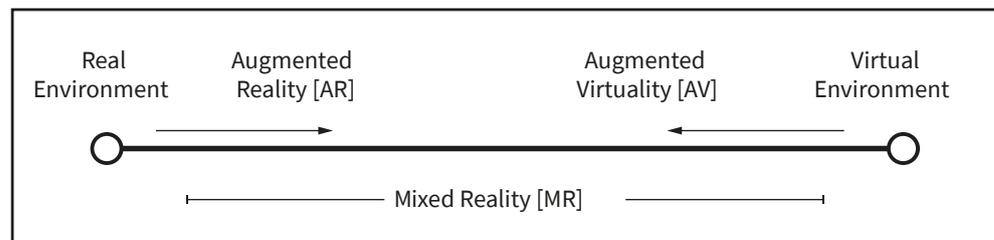


Abb. 1: Reality-Virtuality Continuum nach Milgram et al. (1994).

Dieses Kontinuum verdeutlicht, dass in der Umsetzung der Konzepte AR und AV unterschiedliche Ausprägungen vorhanden sind. Beispielsweise bezieht sich eine nur leicht erweiterte Realität («lightly augmented reality») auf Situationen, in denen Benutzer eine grosse Menge an Informationen und physischen Materialien aus der realen Welt nutzen und Zugang zu relativ wenigen virtuellen Informationen haben. Die Benutzenden agieren hauptsächlich mit physischen Materialien und Objekten und greifen nur gelegentlich auf virtuelle Objekte zu. In einer stark erweiterten Realität («heavily augmented reality») sind dagegen vermehrt virtuelle Informationen verfügbar, die von den Benutzenden genutzt werden können. Hierzu werden meist immersive Technologien, wie z. B. Head-Mounted Displays, eingesetzt (Wu et al. 2013).

AR-Anwendungen können gemäss Tzima, Styliaras und Bassounas (2019, 2) in zwei Hauptkategorien unterteilt werden: (1) bildbasierte (Image-Based) und (2) ortsbezogene (Location-Based) Anwendungen (siehe auch Altinpulluk 2019). Bei (1) bildbasierten Anwendungen werden Objekte als sogenannte Triggerbilder verwendet. Neben QR-Codes können auch andere Objekte oder Indikatoren verwendet werden, um die Technologie zur Augmentation auszulösen. Solche Trigger in der realen Welt können Bilder oder nahezu beliebige Objekte der realen Welt sein (z. B. ein Globus, ein Gebäude etc.). Bildbasierte Anwendungen werden damit in zwei Unterkategorien unterteilt: (a) markerbasierte Anwendungen, die bestimmte Kennzeichnungen

erfordern (z. B. einen QR-Code) und (b) markerlose Anwendungen, bei denen durch Objekterkennung ein Bild oder ein Gegenstand zum Auslöser für die Wiedergabe von Multimedia-Inhalten wird. Normalerweise verfügen die Lernenden bei solchen Anwendungen über ein mobiles Gerät wie ein Tablet, Smartphone oder eine AR-Brille, die eine Kamera enthält. Sie richten dann die Kamera auf ein Objekt und die AR-Software liefert die Augmentierung des realen Objekts. Für (2) ortsbezogene Anwendungen benötigt das Gerät Zugriff auf das Global Positioning System (GPS) oder eine andere Technologie zur Positionsbestimmung, da die Darstellung der digitalen Informationen von der Position des Nutzers bzw. der Nutzerin abhängig ist (Buchner und Zumbach 2020).

Wie die bisherigen Ausführungen zeigen, können AR-Anwendungen auf unterschiedlichen Geräten implementiert werden. Allen AR-Geräten gemein ist die extensive Nutzung von Bewegungs- und Orientierungssensorik sowie Tracking zur Überlagerung der beiden Welten (Peddie 2017; Kesim und Ozarslan 2012). Zur Darstellung von Augmented Reality können mobile Geräte (Handheld) wie Smartphones oder Tablets zum Einsatz kommen, wie auch PCs oder tragbare Geräte (Wearable) wie Head-Up Displays oder Head-Mounted Displays (HMD). HMDs sind Displays oder Projektionstechnologien, die an einem Helm oder einer Kappe angebracht oder in eine Brille integriert sind, wie beispielsweise bei Microsoft HoloLens. Head-Up Displays sind eine Art von HMD, welche die Sicht der Benutzerin oder des Benutzers nicht durch ein opakes Display o. Ä. einschränken, sondern das virtuelle Bild mithilfe einer Glasscheibe in der Nutzerperspektive auf die reale Welt projizieren. Diese Technologie wird beispielsweise bei bestimmten Navigations- und Geschwindigkeitsanzeigen in Fahrzeugen eingesetzt (Gartner Information Technology Glossary o. J.). Eine weitere Lösung sind Projektoren, welche unter anderem ohne das Tragen oder direkte Nutzen von Geräten durch die Benutzerin bzw. den Benutzer auskommen, beispielsweise bei der AR Sandbox (Peddie 2017, 42f.; Kesim und Ozarslan 2012; Broll 2013).

3. Historischer Blick auf die Entwicklung von AR und dessen Einsatz im Bildungsbereich

Gemäss Johnson, Levine, Smith und Stone (2010) geht der Begriff Augmented Reality (AR) auf den ehemaligen Boeing-Forscher Tom Caudell zurück, der ihn im Jahr 1990 ins Leben gerufen haben soll. Die Technologie ist jedoch älter als der Begriff, denn die ersten Anwendungen von AR erschienen in den späten 1960er- und den 1970er-Jahren. Seit den 1990er-Jahren wurde AR von einer Reihe von grossen Unternehmen für Visualisierungen, Schulungen und andere Zwecke eingesetzt (Lee 2012).

Das erste AR-System, das ausschliesslich für den Einsatz im Bildungsbereich entwickelt wurde, war ein Tool für die Vermittlung dreidimensionaler Anatomie. Das Gerät war eine Art von Head-Mounted Display und wurde an der University of

North Carolina entwickelt. Es projizierte Knochenstrukturen auf reale anatomische Gegenstände eines menschlichen Probanden, um damit Anatomie zu lehren (Garzón 2021).¹ Im Zeitraum von 1995 bis 2009 kamen vor allem Anwendungen auf Basis von Head-Mounted Displays und Head-Up Displays zum Einsatz. Die AR-Anwendungen wurden zur Ergänzung der Lernprozesse in den Bereichen Gesundheit, Technik und Naturwissenschaften eingesetzt. Die meisten dieser Anwendungen waren für Bachelor-Studierende gedacht und nur wenige Bildungseinrichtungen konnten sich solche Anwendungen angesichts ihrer hohen Kosten überhaupt leisten (Garzón 2021). Das Aufkommen von Game Engines, Software Development Kits (SDKs) und Bibliotheken zur Entwicklung von AR-Anwendungen gab der Technologie neuen Anstoss und stärkte den Forschungs- und Entwicklungsfokus im Bereich der Softwareapplikationen. Seitdem hat sich die Technologie weiterentwickelt und wurde dank der Zugänglichkeit von Smartphones und Tablets weit verbreitet. Die Herstellung von AR-spezifischen Geräten wie Smartglasses, z. B. Google Glass oder Microsofts HoloLens, hat das Interesse an dieser Technologie weiter vorangetrieben (Elmqaddem 2019). Daneben wird vermehrt Aufmerksamkeit auf web-basierte AR-Anwendungen sowie den Einbezug von künstlicher Intelligenz gerichtet (Garzón 2021).

AR-Programme können sowohl in der Entwicklung als auch in der Anwendung unterschiedlich komplex sein. Programme mit passiv konsumierbaren Inhalten (d. h. Bilder, Videos, Audio), die konventionelle Lernmaterialien ergänzen, sind verhältnismässig einfach zu erstellen. Lerninhalte, die interaktiv sind und z. B. Elemente von Computerspielen umfassen, können hingegen unbegrenzt komplex werden. Zudem sind sie weniger gut mit herkömmlichen Lernmaterialien kombinierbar (Kljun, Geroimenko, und Čopič Pucihar 2020). Mit der Steigerung der Interaktionsmöglichkeiten in den Programmen gewinnt zudem die Kontrolle durch den Benutzer oder die Benutzerin verstärkt an Bedeutung. Diese Kontrollmöglichkeiten sind je nach Hardwarelösung unterschiedlich. Gängige Kontrollmuster sind Berührungen (Touchscreen) oder erkennbare Gestik (Hand- und Fingerbewegungen), aber auch die Bewegung der Augen (Eye-Tracking), die Rotation des Kopfes, Eingabe via Sprachsteuerung oder zusätzliche Geräte wie z. B. ein Klicker (ähnlich einer Computermaus). Auch eine Steuerung des Programms durch Bewegen des gesamten Körpers (Repositionierung) ist möglich.

1 Eine moderne Variante dieses Verfahrens ist die Smartphone-Applikation Virtuali-Tee der Firma Curiscope, welche ebenfalls die menschliche Anatomie tracker-basiert auf ein spezielles T-Shirt überlagert. <https://www.curiscope.com/products/virtuali-tee>.

4. Bisherige Erkenntnisse aus der Forschung zu AR in Bildungsbereichen

In den letzten Jahren haben sich vielfältige Forschungsprojekte im Zusammenhang mit Augmented Reality entwickelt. Diese Projekte sind in diversen Bereichen angesiedelt wie Medizin, Maschinenbau und Technik, Architektur, Raumgestaltung, Mathematik und Naturwissenschaften sowie Marketing und Verkehr (Yuen, Yaoyuneyong, und Johnson 2011). Auch im Bildungswesen wurden empirische Studien durchgeführt, wobei dieser Bereich im Vergleich zu anderen Disziplinen bzw. zu anderen digitalen Lehr-Lern-Technologien wie Multimedia und Webdiensten noch immer eher weniger beforscht ist (Kljun, Geroimenko, und Čopič Pucihar 2020).

Gemäss Garzón (2021) wurde die erste Studie, die sich mit AR im Bildungsbereich beschäftigt hat, im Jahr 1996 publiziert.² Bis 2005 wurde jährlich lediglich eine kleine Anzahl an Publikationen im einstelligen Bereich verzeichnet. Erst ab 2006 nahm die Anzahl an Publikationen stetig zu. Es waren in diesem Jahr erstmals über 10 und ab 2013 sodann über 100 Publikationen. Die deutlichsten Anstiege sind von 2014 auf 2015 und von 2016 auf 2017 zu erkennen. Dies deckt sich mit zwei entscheidenden Ereignissen: einerseits der Markteinführung der öffentlichen Version von Google Glass im Jahr 2014, andererseits der Erscheinung von Pokémon Go im Jahr 2016. Diese beiden Ereignisse brachten AR-Technologien in den Fokus der Öffentlichkeit und waren damit bedeutende Treiber für die Popularität von AR. Dies veranlasste viele Entwickler weltweit dazu, AR-Anwendungen für den Bildungsbereich zu erstellen (ebd.).

Die Erkenntnisse der bisherigen Arbeiten wurden in den letzten Jahren in verschiedenen Literaturstudien und Metaanalysen zusammengefasst (z. B. Akçayır und Akçayır 2017; Hantono, Nugroho, und Santosa 2018; Sirakaya und Alsancak Sirakaya 2018; Garzón, Pavón, und Baldiris 2019; Garzón und Acevedo 2019; Garzón et al. 2020). Aus diesen Studien wird ersichtlich, dass der Einsatz von AR im Bildungsbereich viele Möglichkeiten und Vorteile bietet, das Lernen zu unterstützen, und es wird dieser neuen Technologie durchwegs grosses Potenzial zugeschrieben. Verschiedene Arbeiten konnten zeigen, dass durch AR das kinästhetische Lernen, das bildliche sowie das räumliche Vorstellungsvermögen unterstützt werden können (Alzahrani 2020; Dunleavy, Dede, und Mitchell 2009) wie auch die Bereitschaft der Lernenden, sich mit wissenschaftlichen Themen zu beschäftigen sowie ihre Motivation und ihr Interesse im Allgemeinen gefördert werden. So wurde berichtet, dass die Lernenden eine höhere Zufriedenheit und mehr Spass empfinden, grössere Aufmerksamkeit zeigen, den Lernaktivitäten mehr Relevanz zuschreiben und im Umgang mit den Lernaktivitäten mehr Selbstvertrauen gewinnen (Radu 2014; Chiang, Yang, und Hwang 2014; siehe dazu auch Bacca Acosta et al. 2014; Akçayır und Akçayır 2017). Ausserdem steigert AR

2 Die von Garzón (2021) gemachten Angaben beruhen auf einer gezielten Literaturrecherche in der Web of Science Datenbank, die im Juli 2020 mit dem Suchbegriff «augmented reality in education» durchgeführt wurde. Berücksichtigt wurden dabei nur Artikel, Tagungsberichte, Rezensionen und Buchkapitel. Die von ihm durchgeführte Suchabfrage ergab 2.698 wissenschaftliche Beiträge, darunter 1.317 Tagungsberichte, 1.857 Zeitschriftenartikel, 100 Reviews und 56 Buchkapitel.

die Kollaboration von Lernenden untereinander sowie zwischen den Lernenden und Dozierenden. Dadurch werden auch die Fähigkeit des kritischen Denkens und Problemlösens, die Fähigkeit zur Informationsverarbeitung sowie kommunikative Fähigkeiten gefördert und der Lerntransfer wird verbessert (z.B. Akçayır und Akçayır 2017; Dunleavy, Dede, und Mitchell 2009; Nincarean et al. 2013; Yuen, Yaoyuneyong, und Johnson 2011; Elmqaddem 2019; Saidin, Halim, und Yahaya 2015; Altinpulluk 2019).

Als herausfordernd werden insbesondere die Bedienbarkeit (Usability), technische Probleme bei der Umsetzung, Tracking- und Kalibrierungsprobleme sowie Mobilitätsprobleme bei der Verwendung im Freien genannt (Akçayır und Akçayır 2017; Altinpulluk 2019). Neben den technischen Herausforderungen wird auf der Seite der Lernenden häufig die kognitive Belastung (Mutlu-Bayraktar, Cosgun, und Altan 2019) thematisiert, zusätzlich fehlen Lehrenden oft die notwendigen Kenntnisse für den Umgang mit den technischen Geräten sowie medienpädagogische Kompetenzen (Buchner und Zumbach 2020; Drossel und Eickelmann 2018). Weitere Einschränkungen können die Kosten für die Anschaffung von Geräten sowie für die Entwicklung und Wartung von AR-Systemen darstellen (Lee 2012). Ausserdem stellen sich Fragen im Zusammenhang mit der Wahrung der Privatsphäre, Datenschutz und ethischen Aspekten. Insbesondere die Diskussionen über den Einsatz von tragbaren Technologien wie Smartglasses und AR-unterstützten bionischen Kontaktlinsen werden im Kontext von Sicherheit, Privatsphäre und Ethik wohl auch zukünftig weitergeführt (Altinpulluk 2019).

In Bezug auf die Zielgruppe von AR-Anwendungen im Bildungsbereich zeigt die systematische Literaturstudie von Akçayır und Akçayır (2017), dass die meisten Studien (51%) sich mit dem Einsatz von AR mit Schüler:innen aus der Sekundarstufe (K-12 students) beschäftigten, 29% (20 Studien) untersuchten den Einsatz von AR bei Hochschulstudierenden, lediglich zwei Studien befassten sich mit Lehrpersonen. In einer kürzlich durchgeführten Literaturstudie von Garzòn, Pavón und Baldiris (2019) wurden ähnliche Ergebnisse gefunden: Die Zielgruppen der Studien beschränkten sich im Wesentlichen auf Kinder (frühkindliche Bildung und Grundschulbildung), Jugendliche (untere und obere Sekundarstufe) und Bachelor- oder gleichwertiges Niveau. Von den 61 Studien, die in die Analyse einbezogen wurden, fielen jeweils etwa 30% in eine dieser Zielgruppen. Postgraduierte (Master- oder PhD-Abschlüsse) wurden in keiner der ausgewählten Studien als Zielgruppe berücksichtigt. Interessanterweise sind Studien auf tertiärem Bildungsniveau (insbesondere Master) und mit (angehenden) Lehrpersonen bisher deutlich unterrepräsentiert. Da Lehrpersonen eine Multiplikatorenrolle besetzen und eine zentrale Funktion für eine erfolgreiche Medienintegration in Schulen einnehmen (Petko und Döbeli Honegger 2011), ist es von Interesse, mehr über deren Haltung, Vorbehalte und Kenntnisse bezüglich der Verwendung von AR-Anwendungen im Bildungskontext zu erfahren. Hier besteht noch ein wesentlicher Forschungsbedarf.

Unzureichend sind bislang auch die Erkenntnisse in Bezug auf die pädagogischen Konzepte für die Integration von AR-Anwendungen in Lernaktivitäten (Garzón 2021). Wie auch bei allen anderen Technologien hängt der pädagogische Wert von AR in erster Linie von der Konzeption und der Integration des Lernarrangements in formale und informelle Lernumgebungen ab, nicht von der verwendeten Technologie (Wu et al. 2013; Nincarean et al. 2013). In den bisherigen Studien wurde dieser Aspekt eher am Rande berücksichtigt oder gar nicht thematisiert.

5. Didaktische Überlegungen zum Einsatz von AR-Anwendungen

Wie erwähnt, sind empirische Erkenntnisse in Bezug auf die pädagogische Umsetzung von AR-Lerneinheiten noch kaum vorhanden. Aus der Literatur wird deutlich, dass im Zusammenhang mit Bildungstechnologien der Konstruktivismus die beliebteste Lerntheorie ist (Garzón et al. 2020). Eine zentrale Idee des Konstruktivismus ist, dass Wissen nicht einfach von der Lehrperson an die Lernenden übertragen wird, sondern von Lernenden in einem aktiven Prozess konstruiert werden muss. Lernende bauen neues Wissen auf der Grundlage des bisher Gelernten auf. Sie überprüfen ihr Wissen im Hinblick auf das, was ihnen in der neuen Lernsituation begegnet, und adaptieren das Wissen in Bezug auf die neuen Erkenntnisse (Bada 2015; Wolf, Söbke, und Baalsrud Hauge 2020; Zhang, Wang, und Wu 2020). Im Sinne der konstruktivistischen Lerntheorie können Lernende durch den Einsatz von AR ermutigt werden, sich aktiv mit den Aufgaben, Konzepten und Materialien zu beschäftigen und so das bestehende Wissen aufzubauen und zu erweitern.

Neben dem Lernparadigma des Konstruktivismus werden in der Literatur auch verschiedene Lehrmethoden bzw. -konzepte genannt, die gemäss den Autor:innen für den Einsatz von AR-Technologien geeignet sind oder dadurch bereichert werden können: situiertes Lernen, spielbasiertes Lernen (Game-Based Learning) und forschendes Lernen (Bower et al. 2014; Cheng und Tsai 2013) sowie kollaboratives Lernen, projektbasiertes Lernen und multimediales Lernen (Garzón et al. 2020). Die Eignung dieser Lernformen ist einerseits abhängig von den Eigenschaften der Lehrperson, der Lernenden und dem Setting (Klassengrösse, verfügbare Geräte etc.), aber auch vom zu lernenden Inhalt. Solche Faktoren und Prozesse werden in Angebots-Nutzungs-Modellen dargestellt und beschrieben (vgl. Seidel 2014) und müssen in die Überlegungen zum Einsatz von AR einbezogen werden.

AR-Anwendungen können demgemäss in unterschiedliche Lernszenarien eingebettet werden. Es gilt dabei primär zu prüfen, ob das didaktische Potenzial der mit AR angereicherten Lerneinheit tatsächlich genutzt wird. Hierzu bietet das von Ruben Puentedura entwickelte SAMR-Modell einen Orientierungsrahmen (Puentedura 2015, 2006). Das Modell besteht aus vier Stufen, die durch die vier Buchstaben repräsentiert werden:

- Substitution (Ersatz): Die verwendete Technologie fungiert als direkter Ersatz für ein anderes Arbeitsmittel (z. B. Schulbücher), ohne dass eine Funktionsänderung ersichtlich ist.
- Augmentation (Erweiterung): Die verwendete Technologie fungiert als direkter Ersatz für ein anderes Arbeitsmittel (z. B. Schulbücher), jedoch mit einer funktionalen Verbesserung.
- Modification (Veränderung): Die Technologie ermöglicht eine erhebliche Umgestaltung der Aufgaben.
- Redefinition (Erneuerung): Die Technologie ermöglicht die Konzeption neuer Aufgaben bzw. Lehr-Lern-Arrangements, die mit herkömmlichen Arbeitsmitteln nicht realisierbar waren.

Das SAMR-Modell ist ein Versuch, die Integration digitaler Medien im Unterricht in verschiedene Stufen einzuteilen. Dabei ist zu beachten, dass die Übergänge zwischen den Stufen fließend sind. Anhand des Modells können Lehrende den Einsatz digitaler Medien in ihrem Unterricht verorten und auf den Digitalisierungsgrad hin kritisch reflektieren. Zudem kann es dazu anregen, den eigenen Unterricht weiterzuentwickeln (Polm und Albrecht o. J.). Das Modell bezieht sich nicht auf spezifische Lernformen. So kann es für alle oben genannten Lehrmethoden bzw. -konzepte verwendet und auch als Orientierungsrahmen für den Einsatz von AR in Lerneinheiten genutzt werden.

6. Bildungsziele für den Einsatz von AR in der Lehrpersonenbildung

In der Ausbildung von Lehrpersonen in den DACH-Ländern bildet die fachwissenschaftliche Ausbildung neben der fachdidaktischen, erziehungswissenschaftlichen und schulpraktischen Ausbildung eine zentrale Komponente des Studiums (Cramer et al. 2020). Primär in Bezug auf die fachliche (z. B. Akçayır et al. 2016), aber auch die berufspraktische (Scheidig 2020) Ausbildung könnte der Einsatz von AR-Technologien das Lernen der Studierenden unterstützen und befördern. Wie bereits erläutert, haben AR-Anwendungen das Potenzial, verschiedene Bereiche positiv zu beeinflussen, beispielsweise die Lernleistung, die Motivation oder die Visualisierung schwer vorstellbarer Lerninhalte (Buchner und Zumbach 2020). Unter Berücksichtigung dieses Hintergrunds erscheint es selbstverständlich, dass der Einsatz von AR-Technologien im Rahmen der Lehrpersonenbildung äusserst sinnvoll wäre.

In Bezug auf die Ausbildung von Lehrpersonen kann darüber hinaus ein weiterer Bereich erwähnt werden, der von Relevanz ist. Die Bildungspolitik schreibt der Nutzung digitaler Medien und Bildungstechnologien im Unterricht aufgrund der fortschreitenden Digitalisierung zunehmend eine hohe Bedeutung zu (Lachner, Scheiter, und Stürmer 2020). Die Lehrpersonen spielen hierbei eine zentrale Rolle:

«Teachers are the common element in every different educational system and play a key role in the integration and acceptance of technology in education» (Tzima, Styliaras, und Bassounas 2019, 1).

Damit Lehrpersonen digitale Medien didaktisch sinnvoll in den Unterricht integrieren können, sind ihre eigenen *kognitiven Fertigkeiten* sowie die damit verbundenen *motivationalen Orientierungen* zentral.

In Bezug auf die *kognitiven Fertigkeiten* wird heute zumeist auf das TPACK-Modell («Technological Pedagogical Content Knowledge») verwiesen. Dieses Modell basiert auf der Konzeptualisierung von Shulman (1986) und beschreibt, wie das Wissen der Lehrenden über Bildungstechnologien und ihr fachdidaktisches Wissen (Pedagogical Content Knowledge: PCK) miteinander interagieren, um einen effektiven Unterricht mit Technologie zu ermöglichen (Koehler und Mishra 2009). In diesem Modell gibt es drei Hauptkomponenten des Lehrpersonenwissens: Fachwissen (Content Knowledge: CK), pädagogisches Wissen (Pedagogical Knowledge: PK) und technologisches Wissen (Technological Knowledge: TK). Ebenso wichtig sind im Modell die Wechselwirkungen zwischen diesen Wissensbeständen, die als PCK (fachdidaktisches Wissen), TCK (technologisches Inhaltswissen) und TPK (technologisch-pädagogisches Wissen) dargestellt werden. Die «Schnittmenge» aller Wissensbereiche bildet das TPACK (technologisch-pädagogisches Inhaltswissen) (vgl. Petko und Döbeli Honegger 2011).

Als weitere Dimension professioneller Kompetenz werden insbesondere die *motivationalen Orientierungen* der Lehrpersonen betrachtet. Damit digitale Medien didaktisch sinnvoll in den Unterricht integriert werden können, ist demgemäss neben den Fachkenntnissen auch die zugrundeliegende Motivation von Bedeutung, digitale Medien im Unterricht einzusetzen (Lachner, Scheiter, und Stürmer 2020). Studien konnten diesbezüglich zeigen, dass Sicherheit und Behaglichkeit von Lehrpersonen im Umgang mit einer Technologie im Allgemeinen Prädiktoren für die Wahrscheinlichkeit ihrer Implementierung im Klassenzimmer darstellen.

Damit Lehrpersonen diese Fertigkeiten erwerben und digitale Medien für den Unterricht effektiv nutzen können, ist neben der Fortbildung auch die Lehrpersonen-ausbildung gefordert, medienpädagogische Inhalte ins Curriculum zu integrieren (Blömeke, Müller, und Eichler 2006). Die Lehrpersonenbildung kann einen wichtigen Beitrag dazu leisten, Lehrpersonen sowohl die fachlichen Grundlagen zu vermitteln wie auch anzuregen, dass sie ihre Überzeugungen zu digitalen Medien überdenken und kritisch reflektieren. Damit wird ihnen das Rüstzeug mitgegeben, in der Berufspraxis digitale Medien zu verwenden und didaktisch sinnvoll in den Unterricht zu integrieren. Obwohl in der Lehrpersonenbildung Bemühungen vorhanden sind, entsprechende Ausbildungselemente zu konzipieren und in die Studiengänge zu implementieren, werden hier noch immer grosse Defizite festgestellt, die unter anderem

auch durch fehlende Expertise unter den Hochschullehrenden begründet werden (Drossel und Eickelmann 2018; van Ackeren et al. 2019). In Bezug auf immersive Technologien sind bislang fast keine Projekte im Bereich der Lehrpersonenbildung vorhanden. Da in der Literatur gerade diesen Technologien ein immenses Potenzial für den Bildungsbereich zugeschrieben wird (Garzón 2021; Martín-Gutiérrez et al. 2015; Dunleavy 2014; Peterson et al. 2020), wäre es äusserst wünschenswert, diese auch in der Lehrpersonenbildung zu erproben und zu implementieren.

7. Fazit

Die Bemühungen um Forschung über AR im Bildungsbereich wurden in den letzten Jahren stark intensiviert. Aufgrund der fortschreitenden technischen Entwicklung aufseiten sowohl der Hardware als auch der Software, wie auch der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie ist hierzu auch weiterhin grosses Interesse in der Forschungsgemeinschaft zu erwarten. Unzureichend sind bislang insbesondere die Erkenntnisse in Bezug auf die pädagogischen Konzepte für die Integration von AR-Anwendungen in Lernaktivitäten (Garzón 2021) sowie im Bereich der Lehrpersonenbildung (Buchner und Zumbach 2020). Da Lehrpersonen der entscheidende Faktor für die Integration digitaler Medien in den schulischen Unterricht darstellen und damit die Digitalisierung der Volksschule konkret beeinflussen (Petko und Döbeli Honegger 2011), sind weiterführende Forschungs- und Entwicklungsprojekte in diesem Bereich von besonderem Interesse.

AR wird in zahlreichen Quellen besonderes Potenzial attestiert. Der alleinige Einsatz dieser Technologie ist jedoch noch kein Garant für gelingenden Unterricht. Lehrpersonen müssen über die erforderlichen Wissensbereiche und Fertigkeiten (vgl. TPACK-Modell) sowie über entsprechende motivationale Orientierungen verfügen (Petko und Döbeli Honegger 2011). Konzepte, beispielsweise das SAMR-Modell, bieten Lehrenden einen Orientierungsrahmen für die gewinnbringende Implementation von AR in den Unterricht.

Der Lehrpersonenbildung fällt hierbei eine bedeutende Rolle zu. Durch die Integration geeigneter Ausbildungsinhalte sowie entsprechender Lehr- und Lernformen können angehenden Lehrpersonen die fachlichen Grundlagen vermittelt werden. Angehende Lehrpersonen sollten im Rahmen der Ausbildung ihre bisherigen Medienerfahrungen reflektieren sowie neue eigene Lernerfahrungen sammeln können. Hierfür ist es nicht ausreichend, lediglich neue technische Tools bereitzustellen und in dafür vorgesehenen Modulen medienbezogene Inhalte zu vermitteln. Entsprechende Themen müssten auch in die fachdidaktischen sowie erziehungswissenschaftlichen Ausbildungselemente integriert werden, sodass Studierende vielfältige Anwendungsbereiche erleben und erproben können (Petko, Döbeli Honegger, und Prasse 2018). Der Einsatz von AR-Anwendungen in unterschiedlichen Bereichen der

Lehrpersonenbildung ist auch deshalb sinnvoll, da grundsätzlich viele Möglichkeiten und Vorteile bestehen, das Lernen zu unterstützen, wie bisherige Studien eindrücklich belegen konnten.

Wie die Ausführungen in diesem Beitrag zeigen, gibt es diverse AR-Anwendungen, die mit herkömmlichen Geräten wie Handy, Tablet oder Laptop umgesetzt werden können. Die unterschiedlichen Möglichkeiten erlauben einen vielseitigen, an Inhalte und individuelle Voraussetzungen angepassten Einsatz. Allerdings müssen hierzu entsprechende Kenntnisse, Fähigkeiten und motivationale Voraussetzungen auch bei den Hochschullehrenden vorhanden sein. Diesbezüglich, wie auch in Bezug auf den Einsatz von AR in dieser Zielgruppe, sind bislang kaum Erfahrungen oder empirische Erkenntnisse vorhanden. Vor diesem Hintergrund wurde an der Pädagogischen Hochschule Zürich das Projekt «Augmented Reality in der Lehrerbildung. Eine explorative Studie mit HoloLens im Fachbereich Naturwissenschaft und Technik» (ALex)³ konzipiert und durchgeführt. Das nachfolgende abschliessende Kapitel gibt einen Einblick in die Studie. Die Ausführungen sollen Impulse und Anregungen für weitere Projekt- und Forschungsvorhaben in der Lehrpersonenbildung geben.

8. Ausblick: Eine explorative Studie mit AR in der Lehrpersonenbildung

Im Projekt ALex wurde untersucht, welche Möglichkeiten, Chancen und Herausforderungen der Einsatz von Augmented Reality in der Ausbildung von Lehrpersonen birgt. Durchgeführt wurde die Studie mit Microsoft HoloLens Version 1, die Ende März 2016 in den amerikanischen und kanadischen Markt eingeführt wurde. Die HoloLens ist ein Augmented-Reality-Headset, welches als Head-Mounted Display verwendet wird. Im visuellen Ausgabegerät können künstliche Objekte und Informationen ins Sichtfeld des Trägers oder der Trägerin projiziert werden, mit denen über verschiedene Gesten interagiert werden kann. Es ist eine immersive Technologie, die eine stark erweiterte Realität («heavily augmented reality») ermöglicht. Ein Vorteil dieser Technologie ist, dass sich die Geräte koppeln lassen, sodass mehrere Personen sich mit den gleichen Lerninhalten beschäftigen und kollaborativ damit arbeiten können. Allerdings sind damit hohe Anschaffungskosten wie auch die Notwendigkeit umfangreichen technischen Wissens seitens der Lehrenden verbunden.

Das erklärte Ziel der Studie lag darin, eine AR-gestützte Lehr-Lerneinheit zu konzipieren und mit Studierenden umzusetzen. Die Erfahrungen und Ergebnisse dieser Studie sollen Hinweise dazu geben, welche Aspekte beim Einsatz von AR in der Ausbildung von Lehrpersonen im Fach Naturwissenschaft und Technik bedacht werden müssen und welche Chancen und Herausforderungen vorhanden sind.

3 Das Projekt wurde durch den SNF unterstützt. SNF Projektnummer: 10DL19_183135 – Digital Lives.

Im Projekt wurde eine Lerneinheit zur Vermittlung von Molekülstrukturen konzipiert, welche eine neuartige Erkundung des Inhalts ermöglicht (vgl. Wyss et al. 2021). Im Sinne des in Kapitel 5 vorgestellten SAMR-Modells lässt sich die verwendete AR-Anwendung als Erweiterung (Augmentation) von herkömmlichen Molekülbrowsern auf Computern verstehen, da die dreidimensionalen Molekülstrukturen tatsächlich dreidimensional im Raum dargestellt und somit auf intuitivere Art und Weise erkundet werden können und kooperative Aufträge leichter umsetzbar werden. Im Vergleich zu papier-basierten Lernmaterialien ist die Aufgabe als Veränderung (Modification) einzuordnen, da Strukturen mit dieser Technik überhaupt erst eigenständig erkundet werden können.

Die Studie wurde mit vier Gruppen von Studierenden an unterschiedlichen Terminen im Mai 2019 durchgeführt. Die Teilnehmenden waren 18 Lehramtsstudierende für die Sekundarstufe I im Fach Naturwissenschaft und Technik der Pädagogischen Hochschule Zürich, die sich freiwillig am Projekt beteiligten.⁴

Nach den Angaben der an der Studie beteiligten Studierenden konnten diese im Rahmen der Lehrpersonenausbildung bis zum Zeitpunkt der Befragung keine Erfahrungen mit AR sammeln. Ihre theoretische sowie praktische Vorerfahrung mit AR-Anwendungen war sehr beschränkt und bezog sich auf vereinzelte Begegnungen mit der Technologie ausserhalb des Studiums. Die Erfahrung, die sie im Rahmen des Projektes mit einer AR-gestützten Lehr-Lerneinheit gemacht haben, beurteilen sie sehr positiv, wie die folgenden zwei exemplarischen Zitate von Studierenden zeigen:

S: «Ich finde schon, denn (-) wenn man nur eigentlich die 2D Abbildung hat, (-) dann hat man schon ein bisschen ein Bild, aber man kann es sich (-) dennoch nicht ganz im Raum vorstellen. Und wenn man es wirklich dann mal so vor sich sieht und selbst daran herumbasteln kann, (-) dann erlernt man es schon (-) wie auf eine andere Weise.» (Interview 10C: 55-61)

S: «Ich denke, ja, es wäre sicher ein Motivationsaspekt. Auch für uns. Um etwas zu lernen. Und auch um ein vertiefteres Wissen zu erlangen. Und ich denke, auch während dem Studium sind wir teilweise weniger, teilweise mehr motiviert, und das war definitiv ein Punkt, wo man sagen könnte: Da wäre man mehr motiviert, würde sich mehr dafür Zeit nehmen, etwas zu lernen.» (Interview 09C: 87)

⁴ Danksagung: Die Autorin und Autoren danken den Mitarbeitenden und Studierenden der Pädagogischen Hochschule Zürich für ihre Teilnahme und tatkräftige Unterstützung im Projekt ALEX. Besonderer Dank geht an Dr. Jan A. Hiss, Computer-Assisted Drug Design, Departement für Chemie und Angewandte Biowissenschaften, ETH Zürich, für seine wertvolle Unterstützung und das Zurverfügungstellen der HoloLens und der Software MoleGram Scientist (die Software wurde von der Firma afca in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich entwickelt und ist nicht frei zugänglich).

Die Erfahrungen und Erkenntnisse der Studie sind sehr ermutigend.⁵ Bei der Arbeit mit den Studierenden konnten viele der in der Literatur erwähnten und in diesem Beitrag dargestellten positiven Aspekte der AR-Technologie beobachtet werden. Es wäre sehr wünschenswert, dass in der Lehrpersonenbildung zukünftig weitere Projekte durchgeführt werden, um die Chancen wie auch die Herausforderungen dieser Technologie noch besser zu erörtern. Auf dieser Grundlage können neue Ideen und Konzepte entwickelt werden, wie AR gewinnbringend in Lehr-Lern-Prozesse integriert und die Ausbildung von Lehrpersonen damit um ein innovatives Element erweitert werden kann. Die Ausführungen in diesem Beitrag sollen hierzu eine anregende Grundlage bilden.

Literatur

- Ackeren, Isabell van, Stefan Aufenanger, Birgit Eickelmann, Steffen Friedrich, Rudolf Kammerl, Julia Knopf, Kerstin Mayrberger, Heike Scheika, Katharina Scheiter, und Mandy Schiefner-Rohs. 2019. «Digitalisierung in der Lehrerbildung. Herausforderungen, Entwicklungsfelder und Förderung von Gesamtkonzepten». *DDS – Die Deutsche Schule* 111 (1): 103–19. <https://doi.org/10.31244/dds.2019.01.10>.
- Akçayır, Murat, und Gökçe Akçayır. 2017. «Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature». *Educational Research Review* 20 (Februar): 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002>.
- Akçayır, Murat, Gökçe Akçayır, Hüseyin Miraç Pektaş, und Mehmet Akif Ocak. 2016. «Augmented reality in science laboratories: The effects of augmented reality on university students' laboratory skills and attitudes toward science laboratories». *Computers in Human Behavior* 57 (April): 334–42. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.12.054>.
- Altınpulluk, Hakan. 2019. «Determining the Trends of Using Augmented Reality in Education between 2006–2016». *Education and Information Technologies* 24 (2): 1089–1114. <https://doi.org/10.1007/s10639-018-9806-3>.
- Alzahrani, Nouf Matar. 2020. «Augmented Reality: A Systematic Review of Its Benefits and Challenges in E-Learning Contexts». *Applied Sciences* 10 (16): 5660. <https://doi.org/10.3390/app10165660>.
- Bacca Acosta, Jorge Luis, Silvia Margarita Baldiris Navarro, Ramon Fabregat Gesa, Sabine Graf, und Kinshuk. 2014. «Augmented Reality Trends in Education: A Systematic Review of Research and Applications», Oktober. <https://dugi-doc.udg.edu/handle/10256/17763>.
- Bada, Dr, und Steve Olusegun. 2015. «Constructivism Learning Theory: A Paradigm for Teaching and Learning». *IOSR Journal of Research & Method in Education* 5 (6): 66–70. <http://doi.org/10.9790/7388-05616670>.

5 Erste Ergebnisse der Studie können in der Publikation von Wyss et al. (2021) nachgelesen werden.

- Blömeke, Sigrid, Christiane Müller, und Dana Eichler. 2006. «Unterricht mit digitalen Medien – zwischen Innovation und Tradition?» *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft* 9 (4): 632–50. <https://doi.org/10.1007/s11618-006-0172-3>.
- Bower, Matt, Cathie Howe, Nerida McCredie, Austin Robinson, und David Grover. 2014. «Augmented Reality in education – cases, places and potentials». *Educational Media International* 51 (1): 1–15. <https://doi.org/10.1080/09523987.2014.889400>.
- Broll, Wolfgang. 2013. «Augmentierte Realität». In *Virtual und Augmented Reality (VR / AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*, herausgegeben von Ralf Dörner, Wolfgang Broll, Paul Grimm, und Bernhard Jung, 241–94 Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-28903-3_8.
- Buchner, Josef. 2017. «Offener Unterricht mit Augmented Reality». *Erziehung & Unterricht* 7–8 (Oktober): 68–73.
- Buchner, Josef, und Jörg Zumbach. 2020. «Augmented Reality in Teacher Education. A Framework to Support Teachers' Technological Pedagogical Content Knowledge.» *Italian Journal of Educational Technology* 28 (2): 106–20. <https://doi.org/10.17471/2499-4324/1151>.
- Carmigniani, Julie, und Borko Furht. 2011. «Augmented Reality: An Overview». In *Handbook of Augmented Reality*, 3–46. New York: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0064-6_1.
- Cheng, Kun-hung, und Chin-chung Tsai. 2013. «Affordances of augmented reality in science learning: suggestions for future research». *Journal of Science Education and Technology* 22. 449–62. <https://doi.org/10.1007/s10956-012-9405-9>.
- Chiang, Tosti H. C., Stephen J. H. Yang, und Gwo-Jen Hwang. 2014. «An Augmented Reality-based Mobile Learning System to Improve Students' Learning Achievements and Motivations in Natural Science Inquiry Activities». *Journal of Educational Technology & Society* 17 (4): 352–65. <https://drive.google.com/file/d/1UoXcAlKOMC0qesxZPm5QxNEoOkuWjF5N/view>.
- Cramer, Colin, Johannes König, Martin Rothland, und Sigrid Blömeke. 2020. *Handbuch Lehrerinnen- und Lehrerbildung*. Bad Heilbrunn: Julius Klinkhardt. <https://elibrary.utb.de/doi/book/10.36198/9783838554730>.
- Drossel, Kerstin, und Birgit Eickelmann. 2018. «Die Rolle der Lehrerprofessionalisierung für die Implementierung neuer Technologien in den Unterricht – Eine Latent-Class-Analyse zur Identifikation von Lehrertypen». Herausgegeben von Jasmin Bastian, Tobias Feldhoff, Marius Haring, und Klaus Rummler. *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung* 31 (Digitale Bildung): 166–91. <https://doi.org/10.21240/mpaed/31/2018.06.04.X>.
- Dunleavy, Matt. 2014. «Design Principles for Augmented Reality Learning». *TechTrends* 58 (1): 28–34. <https://doi.org/10.1007/s11528-013-0717-2>.
- Dunleavy, Matt, Chris Dede, und Rebecca Mitchell. 2009. «Affordances and Limitations of Immersive Participatory Augmented Reality Simulations for Teaching and Learning». *Journal of Science Education and Technology* 18 (1): 7–22. <https://doi.org/10.1007/s10956-008-9119-1>.

- EDUCA. 2021. «Digitalisierung in der Bildung». Bern: EDUCA. https://www.educa.ch/sites/default/files/2021-10/Digitalisierung_in_der_Bildung.pdf.
- Eickelmann, Birgit. 2018. «Digitalisierung in der schulischen Bildung. Entwicklungen, Befunde und Perspektiven für die Schulentwicklung und die Bildungsforschung». In *Digitalisierung in der schulischen Bildung: Chancen und Herausforderungen*, herausgegeben von Nele McElvany, Franziska Schwabe, Wilfried Bos, und Heinz Günter Holtappels, 11–25. Münster, New York: Waxmann.
- Elmqaddem, Nouredine. 2019. «Augmented Reality and Virtual Reality in Education. Myth or Reality?» *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)* 14 (03): 234. <https://doi.org/10.3991/ijet.v14i03.9289>.
- Gartner Information Technology Glossary. o. J. «Definition of Head-Mounted Displays (HMDs)». Gartner. Zugegriffen 11. August 2021. <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/head-mounted-displays-hmd>.
- Garzón, Juan. 2021. «An Overview of Twenty-Five Years of Augmented Reality in Education». *Multimodal Technologies and Interaction* 5 (7): 37. <https://doi.org/10.3390/mti5070037>.
- Garzón, Juan, und Juan Acevedo. 2019. «Meta-Analysis of the Impact of Augmented Reality on Students' Learning Gains». *Educational Research Review* 27 (Juni): 244–60. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.04.001>.
- Garzón, Juan, Kinshuk, Silvia Baldiris, Jaime Gutiérrez, und Juan Pavón. 2020. «How Do Pedagogical Approaches Affect the Impact of Augmented Reality on Education? A Meta-Analysis and Research Synthesis». *Educational Research Review* 31 (November): 100334. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2020.100334>.
- Garzón, Juan, Juan Pavón, und Silvia Baldiris. 2019. «Systematic Review and Meta-Analysis of Augmented Reality in Educational Settings». *Virtual Reality* 23 (4): 447–59. <https://doi.org/10.1007/s10055-019-00379-9>.
- Hantono, Bimo Sunarfri, Lukito Edi Nugroho, und P. Insap Santosa. 2018. «Meta-Review of Augmented Reality in Education». In *2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)*, 312–15. <https://doi.org/10.1109/ICITEE-ED.2018.8534888>.
- Hartong, Sigrid. 2019. «Bildung 4.0? Kritische Überlegungen zur Digitalisierung von Bildung als erziehungswissenschaftliches Forschungsfeld». *Zeitschrift für Pädagogik*, Nr. 3 (Juni): 424–44.
- Johnson, L., A. Levine, R. Smith, und S. Stone. 2010. *The 2010 Horizon Report. New Media Consortium*. New Media Consortium. <https://library.educause.edu/resources/2010/1/2010-horizon-report>.
- Kesim, Mehmet, und Yasin Ozarslan. 2012. «Augmented Reality in Education: Current Technologies and the Potential for Education». *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, Cyprus International Conference on Educational Research (CY-ICER-2012) North Cyprus, US08-10 47 (Januar): 297–302. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.654>.

- Kljun, Matjaž, Vladimir Geroimenko, und Klen Čopič Pucihar. 2020. «Augmented Reality in Education: Current Status and Advancement of the Field». In *Augmented Reality in Education: A New Technology for Teaching and Learning*, herausgegeben von Vladimir Geroimenko, 3–21. Springer Series on Cultural Computing. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42156-4_1.
- Koehler, Matthew, und Punya Mishra. 2009. «What Is Technological Pedagogical Content Knowledge (TPACK)?» *Contemporary Issues in Technology and Teacher Education* 9 (1): 60–70. <https://www.learntechlib.org/p/29544/>.
- Lachner, Andreas, Katharina Scheiter, und Kathleen Stürmer. 2020. «Digitalisierung und Lernen mit digitalen Medien als Gegenstand der Lehrerinnen- und Lehrerbildung». In *Handbuch Lehrerinnen- und Lehrerbildung*, herausgegeben von Colin Cramer, Johannes König, Martin Rothland, und Sigrid Blömeke, 67–75. Bad Heilbrunn: Julius Klinkhardt. <https://elibrary.utb.de/doi/book/10.36198/9783838554730>.
- Lee, Kangdon. 2012. «Augmented Reality in Education and Training». *TechTrends* 56 (2): 13–21. <https://doi.org/10.1007/s11528-012-0559-3>.
- Martín-Gutiérrez, Jorge, Peña Fabiani, Wanda Benesova, María Dolores Meneses, und Carlos E. Mora. 2015. «Augmented reality to promote collaborative and autonomous learning in higher education». *Computers in Human Behavior, Computing for Human Learning, Behaviour and Collaboration in the Social and Mobile Networks Era*, 51 (Oktober): 752–61. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2014.11.093>.
- Milgram, Paul, Haruo Takemura, Akira Utsumi, und Fumio Kishino. 1994. «Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum». *Proc. SPIE* 2351: 282–92. <https://doi.org/10.1117/12.197321>.
- Mutlu-Bayraktar, Duygu, Veysel Cosgun, und Tugba Altan. 2019. «Cognitive Load in Multimedia Learning Environments: A Systematic Review». *Computers & Education* 141 (November): 103618. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103618>.
- Nincarean, Danakorn, Mohamad Bilal Alia, Noor Dayana Abdul Halim, und Mohd Hishamuddin Abdul Rahman. 2013. «Mobile Augmented Reality: The Potential for Education». *Procedia – Social and Behavioral Sciences* 103 (November): 657–64. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.10.385>.
- Peddie, Jon. 2017. «Types of Augmented Reality». In *Augmented Reality: Where We Will All Live*, herausgegeben von Jon Peddie, 29–46. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54502-8_2.
- Peterson, Celeste N., Sara Z. Tavana, Olukemi P. Akinleye, Walter H. Johnson, und Melanie B. Berkmen. 2020. «An Idea to Explore: Use of Augmented Reality for Teaching Three-dimensional Biomolecular Structures». *Biochemistry and Molecular Biology Education* 48 (3): 276–82. <https://doi.org/10.1002/bmb.21341>.

- Petko, Dominik, und Beat Döbeli Honegger. 2011. «Digitale Medien in der schweizerischen Lehrerinnen- und Lehrerbildung: Hintergründe, Ansätze und Perspektiven». *Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung* 29 (2): 155–71. <https://doi.org/10.5167/uzh-170319>.
- Petko, Dominik, Beat Döbeli Honegger, und Doreen Prasse. 2018. «Digitale Transformation in Bildung und Schule: Facetten, Entwicklungslinien und Herausforderungen für die Lehrerinnen- und Lehrerbildung». *Beiträge zur Lehrerinnen- und Lehrerbildung* 36 (2): 157–74.
- Polm, Jari, und Stefanie Albrecht. o. J. «SAMR-Modell. Entwicklung von Unterricht mit Hilfe dieses Modells». *Digitaler Unterricht*. <https://www.digi-teach.de/theoretische-hintergruende-1/samr-modell/>.
- Puentedura, Ruben R. 2015. «SAMR: A Brief Introduction». http://hippasus.com/rrpweblog/archives/2015/10/SAMR_ABriefIntro.pdf.
- Puentedura, Ruben R. 2006. «Transformation, Technology, and Education». <http://www.hippasus.com/resources/tte/>.
- Radu, Iulian. 2014. «Augmented reality in education: a meta-review and cross-media analysis». *Personal and Ubiquitous Computing* 18 (6): 1533–43.
- Saidin, Nor, Noor Abd Halim, und Noraffandy Yahaya. 2015. «A Review of Research on Augmented Reality in Education: Advantages and Applications». *International Education Studies* 8 (13). <https://doi.org/10.5539/ies.v8n13p1>.
- Scheidig, Falk. 2020. «Lehren lernen mit digitalen Medien: Technologiestützte Praxisbezüge in der Lehrpersonenbildung». *MedienPädagogik: Zeitschrift für Theorie und Praxis der Medienbildung*, September, 675–708. <https://doi.org/10.21240/mpaed/jb17/2020.05.26.X>.
- Seidel, Tina. 2014. «Angebots-Nutzungs-Modelle in der Unterrichtspsychologie. Integration von Struktur- und Prozessparadigma». *Zeitschrift für Pädagogik* 60 (6): 850–66. <https://doi.org/10.25656/01:14686>.
- Shulman, Lee S. 1986. «Those Who Understand: Knowledge Growth in Teaching». *Educational Researcher* 15 (2): 4–14. <https://doi.org/10.3102/0013189X015002004>.
- Sirakaya, Mustafa, und Didem Alsancak Sirakaya. 2018. «Trends in Educational Augmented Reality Studies: A Systematic Review». *Malaysian Online Journal of Educational Technology* 6 (2): 60–74. <https://doi.org/10.17220/mojet.2018.02.005>.
- Steppuhn, Detlef. 2019. «Treiber der Zukunft – Robotik, Künstliche Intelligenz, Big Data, Virtual Reality/Augmented Reality und 3D». In *SmartSchool – Die Schule von morgen*, herausgegeben von Detlef Steppuhn, 237–40. Wiesbaden: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-658-24873-4_12.
- Tzima, Stavroula, Georgios Styliaras, und Athanasios Bassounas. 2019. «Augmented Reality Applications in Education: Teachers Point of View». *Education Sciences* 9 (2): 99. <https://doi.org/10.3390/educsci9020099>.

- Wolf, Mario, Heinrich Söbke, und Jannicke Baalsrud Hauge. 2020. «Designing Augmented Reality Applications as Learning Activity». In *Augmented Reality in Education: A New Technology for Teaching and Learning*, herausgegeben von Vladimir Geroimenko, 23–43. Springer Series on Cultural Computing. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42156-4_2.
- Wu, Hsin-Kai, Silvia Wen-Yu Lee, Hsin-Yi Chang, und Jyh-Chong Liang. 2013. «Current status, opportunities and challenges of augmented reality in education». *Computers & Education* 62 (März): 41–9. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.10.024>.
- Wyss, Corinne, Wolfgang Bühner, Florian Furrer, Adrian Degonda, und Jan A. Hiss. 2021. «Innovative Teacher Education with the Augmented Reality Device Microsoft HoloLens – Results of an Exploratory Study and Pedagogical Considerations». *Multimodal Technologies and Interaction* 5 (8): 1–17. <https://doi.org/10.3390/mti5080045>.
- Yuen, Steve Chi-Yin, Gallayanee Yaoyuneyong, und Erik Johnson. 2011. «Augmented Reality: An Overview and Five Directions for AR in Education». *Journal of Educational Technology Development and Exchange* 4 (1). <https://doi.org/10.18785/jetde.0401.10>.
- Zhang, Danyang, Minjuan Wang, und Junjie Gavin Wu. 2020. «Design and Implementation of Augmented Reality for English Language Education». In *Augmented Reality in Education: A New Technology for Teaching and Learning*, herausgegeben von Vladimir Geroimenko, 217–34. Springer Series on Cultural Computing. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42156-4_12.