

SASCHA MÜLLER (Pädagogische Hochschule Weingarten)  
STEFAN KRUSE (Pädagogische Hochschule Weingarten)

## **Systematisches Review: Augmented Reality in der technischen Bildung**

### **Herausgeber**

BERND ZINN

RALF TENBERG

DANIEL PITTICH

**Journal of Technical Education (JOTED)**

ISSN 2198-0306

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



SASCHA MÜLLER / STEFAN KRUSE

## **Systematisches Review: Augmented Reality in der technischen Bildung**

**ZUSAMMENFASSUNG:** Augmented Reality (AR) hat, dank gesunkener Anforderungen und Kosten, in den vergangenen Jahren an Beliebtheit gewonnen. Gestiegen ist auch das Forschungsinteresse zum Einsatz von AR im Bildungsbereich. Bisher konnten für zahlreiche Fachbereiche positive Effekte z. B. auf den Wissenserwerb und die Motivation nachgewiesen werden. Ziel dieses Reviews ist es einen strukturierten Überblick zum Einsatz von AR in der Technikdidaktik zu liefern. Zudem soll kritisch geprüft werden, inwiefern dabei Technik im Spannungsfeld von humanen und sozialen Aspekten abgebildet wird.

*Schlüsselwörter:* Augmented Reality, Review, Technikdidaktik

## **Systematic Review: Augmented Reality in technical education**

**ABSTRACT:** Augmented Reality (AR) became more popular in the last years since requirements and cost have sunk. Also, research interest for AR in education increased. Until now positive effects like increased learning gains and motivation in several departments were demonstrated. Goal of this review is to provide a structured outline of AR in technical education. Moreover, it will be critically examined how well human and social aspects of technology are considered in respective applications.

*Keywords:* Augmented Reality, Review, Engineering, Education

## 1 Einleitung

Neben den Bereichen Tourismus, Architektur, Konstruktion, Wartung, Militärtechnik, Medizin und Unterhaltung zählen Bildung und Training zu den häufigsten Anwendungsbereichen von AR (vgl. Carmigniani et al. 2010; Chatzopoulos et al. 2017; Cipresso et al. 2018; Dörner et al. 2019, S. 345–347). Wie die erweiterte Suche in der Datenbank IEEE Xplore, zum Thema Augmented Reality im Bildungsbereich zeigt, hat die Anzahl der dazu jährlich publizierten Beiträge, in den letzten zehn Jahren, erheblich zugenommen (siehe Abbildung 1).

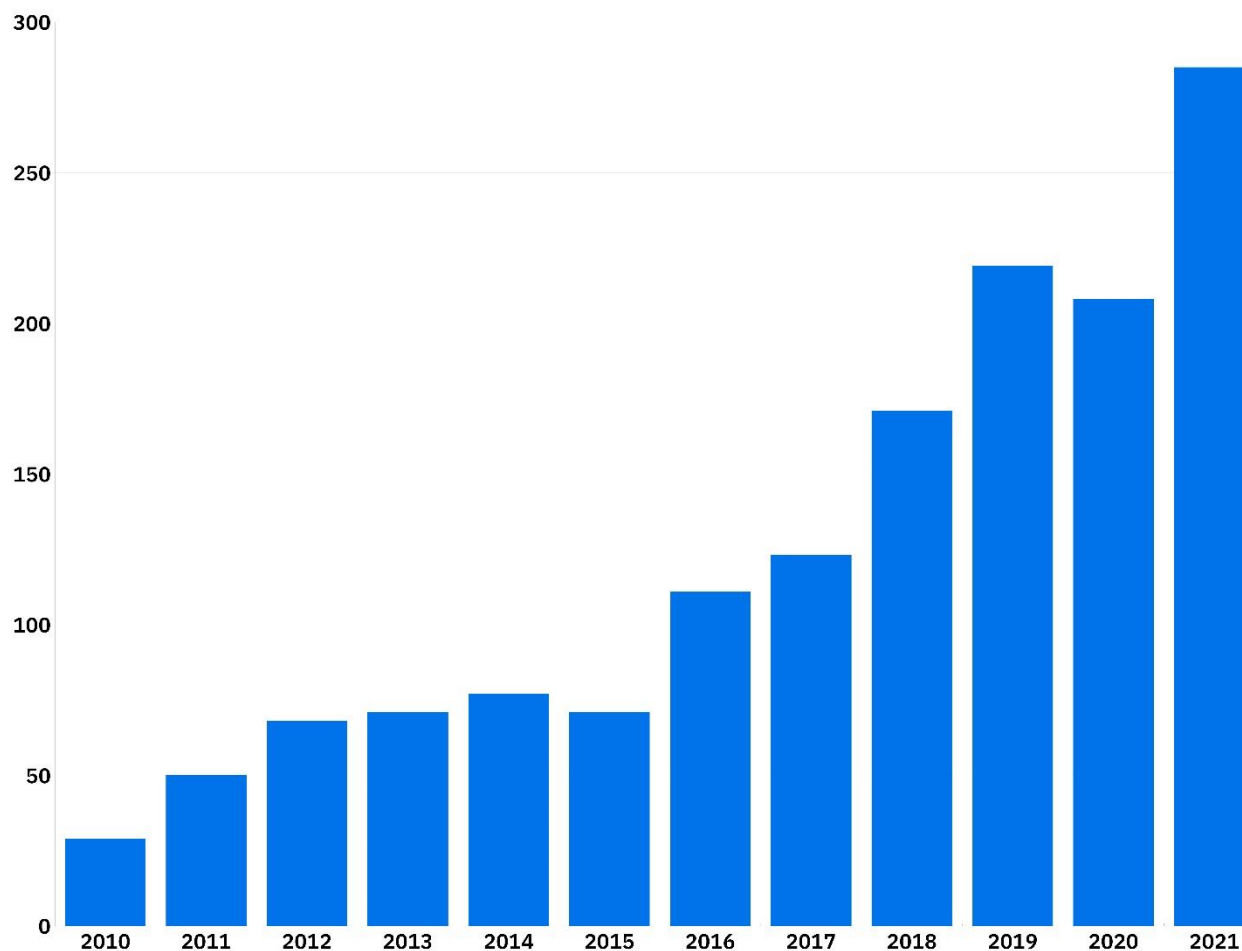


Abb. 1: Anzahl der auf IEEE Xplore veröffentlichten Beiträge mit den Suchkriterien („All Metadata“:Augmented Reality) AND („All Metadata“:Education), pro Jahr (Eigene Darstellung)

Akçayır und Akçayır (2017) sehen die Gründe für das gestiegene Interesse an AR im Bildungsbereich in den gesunkenen Anforderungen an Hardware sowie den niedrigen Einstiegshürden für die Entwicklung entsprechender Software, wodurch Anwendungen mittlerweile für die breite Masse der Nutzenden mobiler Endgeräte verfügbar sind. Es verwundert daher auch nicht, dass zum Zeitpunkt der von ihnen durchgeführten Studie, 60 % der AR-Anwendungen im didaktischen Bereich auf mobile Endgeräte ausgelegt waren.

Wie bei der Verwendung jedes Mediums, stellt sich Lehrenden allerdings auch hier die Frage nach potenziellen Vor- und Nachteilen, da der Einsatz von Medien im Lehr-/ Lernkontext kein Selbstzweck sein darf. Um auf diesem Gebiet durchdachte Entscheidungen treffen zu können, sollte es „für angehende Lehrpersonen im Technikunterricht [...] 'state of the art' sein, dass sie

Experten in digitalen Medien sind, da diese letztendlich immer auch Ausdruck technischer Entwicklung sind“ (Graube 2018, S. 51). Diese Medienkompetenz zu erreichen gelingt nach Kerres (2020), indem mediendidaktisches Wissen integraler Teil fachdidaktischer Curricula wird. Lehrende müssen dabei die Fähigkeit entwickeln, Medienformate sowie einzelne Artefakte vor dem jeweiligen fachdidaktischen Hintergrund evaluieren zu können. Medienspezifische Charakteristika zu kennen, ist die Voraussetzung, um geeignete Einsatzszenarien identifizieren zu können.

Das vorliegende Review liefert dementsprechend einen Überblick zu aktuellen Systemen und ihren technischen Charakteristika. Ziel ist es dabei, ausgehend von einer Betrachtung des Forschungsstands zu den Effekten von AR in allgemeinen Lehr-/ Lernkontexten, erstens den aktuellen Forschungsstand zu AR in der Technikdidaktik zu dokumentieren und zweitens zu untersuchen, inwiefern die dabei zum Einsatz kommenden Anwendungen dem Anspruch der Technikdidaktik gerecht werden Inhalte im Kontext natürlicher, humaner und sozialer Aspekte (vgl. Ropohl 2009, S. 29–43) zu vermitteln.

## 2 Forschungsstand zu den Effekten von AR in allgemeinen Lehr-/ Lernkontexten

Reviews der vergangenen Jahre kamen oft zu ähnlichen Ergebnissen (siehe Tabelle 1). Akçayır und Akçayır (2017) teilen die in ihrem Review dokumentierten Vorteile in die Kategorien „*Learner outcomes*“, „*Pedagogical contributions*“ und „*Interaction*“ auf – eine Struktur, die auch für die Gegenüberstellung in Tabelle 1 übernommen wurde. Herauszustellen ist der in allen Reviews erwähnte Lernerfolg, der bei Garzón, Pavón und Baldiris (2019) sogar in 83,6 % der untersuchten Studien dokumentiert wurde, dicht gefolgt von einer Steigerung der Motivation, die sie in 75,4 % der Studien feststellen konnten, was sich auch bei Akçayır und Akçayır (2017) bei den Betrachtungen Diegmans und seiner Kollegen und Kolleginnen (2015), sowie im Review von Majeed und Ali (2020) widerspiegelt.

Tab. 1: Effekte von AR im Lehr-/ Lernkontext (Eigene Gegenüberstellung von Faktoren, die aus den jeweiligen Quellen extrahiert wurden)

AR in allgemeinen Lehr-/ Lernkontexten				AR in Lehr-/ Lernkontexten der Technikdidaktik
Akçayır & Akçayır (2017)	Diegmans et al. (2015)	Garzón et al. (2019)	Majeed & Ali (2020)	Sırakaya & Sırakaya (2020)
<b>Learner Outcomes</b>				
Enhancing learning achievement	Improved learning curve	Learning gains	More learning gains	Increases achievement
Enhancing learning motivation	Increased motivation	Motivation	Motivation	Increases motivation
Helps students to understand				
Provide positive attitude				Develops positive attitudes

Enhancing satisfaction	Increased satisfaction		Satisfaction	Increases satisfaction
Decreases cognitive load			Reduce mental load	Reduces cognitive load
Enhancing confidence				
Enhances spatial ability	Development of spatial abilities			Develops spatial ability
	Increased creativity	Creativity		
	Improved memory	Memory retention	Preserving information	
	Increased concentration		Concentration	
	Increased attention		Attention	
			Critical thinking and analysis	Develops cognitive abilities
			Learning is faster and easier	Makes learning easier
				Provides permanent learning
				Provides in-depth learning
<b>Pedagogical Contributions</b>				
Enhances enjoyment				Fun learning
Raising the level of engagement			Engagement	Increases class engagement
Increases interest				Increases interest
Provides collaboration opportunities for students	Improved collaborative learning	Collaboration	Collaborative learning	Cooperative learning
Facilitates communication between students and lecturer				Individualized teaching
Promotes self-learning				
Combines the physical and virtual worlds				Provides a sense of presence
Allows learners to learn by doing				Informal learning

Student-centered technology	Increased student-centered learning		Student-centered learning	Student-centered learning
Enables multi-sensory learning		Sensory engagement		
Enables learners to quickly receive information	Increased information accessibility	Accessibility		
		Autonomy		Learning at desired time and space
<b>Interaction</b>				
Providing interaction opportunities (student-student)				Increases interaction among students
Student-material	Increased interactivity		Interactivity	Increases interaction between student and course content
Student-teacher				Provides real-time interaction
<b>Other</b>				
Enables visualization of invisible concepts, events, and abstract concepts	Increased details	Abstract concepts	Visual aids	Visualization (object, event, etc. that cannot be seen with the naked eye)/ Concretizes abstract concepts
AR is easy for students to use				Easy to use
Reduces laboratory material cost	Reduced costs		Reduce cost	Reduces costs (laboratory equipment and supplies)
			Visual appealing [sic]	
				Enables safe application of dangerous experiments etc.
				Suitable for laboratory courses

Auch wenn selten explizit erwähnt, kann die Verwendung von AR dennoch Nachteile mit sich bringen, was Garzón und seine Kollegen (2019) in 15 % der von ihnen betrachteten Studien feststellen konnten. Diese entstehen häufig nicht aus der AR selbst, sondern mittelbar durch technische Einschränkungen, wie dem unzuverlässigen Erkennen von Markern, fehlerhafter GPS-Ortung oder zu geringer Bandbreite für den Austausch großer Datenmengen (vgl. Akçayır & Akçayır 2017; vgl. Garzón et al. 2019; Sirakaya & Sirakaya 2020). Neben den technischen Problemen können der falsche Einsatz durch Lehrende (vgl. Akçayır & Akçayır 2017) oder gar deren Verweigerung gegenüber der neuen Technik (vgl. Garzón et al. 2019; Sirakaya & Sirakaya 2020) zu Schwierigkeiten führen. Nicht selten liegt dem die Komplexität des Mediums und des dafür nötigen Settings zugrunde, was auch für die Lernenden zur Herausforderung werden kann (vgl. Akçayır & Akçayır 2017; Garzón et al. 2019).

Alles in allem zeichnet der aktuelle Forschungsstand jedoch ein überwiegend positives Bild von AR als Lernmittel. Auf den Bereich der Technikdidaktik lassen sich die bisherigen Erkenntnisse aber nur bedingt übertragen. Grund hierfür ist die Sonderstellung der Technikdidaktik im deutschsprachigen Raum. Während der Fächerverbund STEM (Science Technology Engineering Mathematics) im englischsprachigen Raum auch die Naturwissenschaften umfasst, werden von Ropohl (1997) deutliche Unterschiede im Verhältnis von Technik und Naturwissenschaften aufgezeigt. Im Review von Sirakaya und Sirakaya (2020), die sich konkret auf AR im Fächerverbund STEM fokussieren, sind somit zwar inhaltliche Überschneidungen zur Technikdidaktik gegeben, diese werden jedoch nicht im Hinblick auf die besonderen Anforderungen der Technikdidaktik hin ausgewertet.

Um diese Lücke zu schließen konzentriert sich das vorliegende Review speziell auf Studien und Anwendungen, die einen klaren Bezug zur Technikdidaktik aufweisen. Im Folgenden Abschnitt soll nun näher auf den Forschungsstand zu AR in Lehr-/ Lernkontexten der Technikdidaktik eingegangen werden. Hierbei wird auch der bisher unberücksichtigten Frage nachgegangen, inwieweit die untersuchten Anwendungen Technik im Spannungsfeld von humanen und sozialen Aspekten abbilden.

### **3 Forschungsstand zu AR in Lehr-/ Lernkontexten der Technikdidaktik**

Das Einsatzgebiet von AR im Lehr-/ Lernkontext ist vielfältig, wird mit 49,2 % aber deutlich von den Naturwissenschaften dominiert (vgl. Garzón et al. 2019). Dass Sirakaya und Sirakaya (2020) in ihrem Review über den Einsatz von AR im Fächerverbund STEM zu ähnlichen Ergebnissen kommen, wie sie bereits für AR im Allgemeinen dokumentiert wurden (siehe Tabelle 1), spricht generell für ein großes Potenzial.

Betrachtet man einige der erwähnten Vorteile (siehe Tabelle 1) fällt auf, dass diese das Potenzial bergen, weit mehr als nur deklaratives Wissen oder Fertigkeiten im Umgang mit technischen Artefakten zu vermitteln. Ein besseres Verständnis, mehr Kreativität, sowie kritisches Denken, um nur einige der gelisteten Vorteile zu nennen, sind wichtige Komponenten für den reflektierten Umgang mit Technik. Über das Verständnis der naturalen Dimension hinaus ermöglichen diese Vorteile somit einen Diskurs über humane und soziale Zusammenhänge. Digitale Möglichkeiten der Interaktion und Kollaboration zwischen Lernenden, sowie Lernenden und Lehrenden können zudem dazu genutzt werden einen sozialen Erfahrungsraum zu schaffen, der eine multiperspektivische Betrachtung technischer Lerninhalte ermöglicht.

So werden z. B. in einem aktuellen Forschungsprojekt der pädagogischen Hochschule Weingarten in Kooperation mit der Universität in Konstanz die Einsatzmöglichkeiten von AR im natur-



und technikwissenschaftlichen Kontext untersucht, wobei das Thema Kunststoffwirtschaft und Mikroplastik als inhaltliche Grundlage in einen lebensweltlichen Bezug zu den Lernenden gestellt wird (Krug et al. 2022). AR wird dabei partiell genutzt, um u. a. Materialeigenschaften erfahrbar zu machen. Der Aufbau des Lehr-/ Lernszenarios ermöglicht dabei kollaboratives Arbeiten mit der AR-Anwendung, wodurch der gedankliche Austausch und die Auseinandersetzung mit humanen und sozialen Fragestellungen gefördert wird. Vermittelt werden somit nicht nur technische Aspekte, wie Materialeigenschaften von Kunststoffen, sondern es wird zur aktiven Auseinandersetzung mit Vor- und Nachteilen unter Einbeziehung humaner und sozialer Faktoren angeregt.

Ob und inwiefern diese Möglichkeiten bisher in AR-Anwendungen mit technikdidaktischem Schwerpunkt genutzt werden, soll u. a. durch dieses Review geklärt werden. Wie Sirakaya und Sirakaya (2020) festhalten, wurde zum Zeitpunkt ihrer Arbeit zwar bereits ein systematisches Review, in diesem Kontext von Ibáñez und Delgado-Kloss (2018), mit weitgehend ähnlichen Ergebnissen durchgeführt, eine Evaluation hinsichtlich der in den AR-Anwendungen berücksichtigten Dimensionen hat bisher jedoch noch nicht stattgefunden. Da jedem Reviewprozess zudem andere Auswahlkriterien zu Grunde liegen, unterschiedliche Datenbanken genutzt werden und das Review von Sirakaya und Sirakaya (2020) bisher nur Artikel bis zum Jahr 2018 berücksichtigt, ist es angebracht, neue Ergebnisse in die Forschung einzubringen, zumal sich die Forschungslage aufgrund beschleunigter Entwicklungen auf technischer Ebene sowie dem damit steigenden Forschungsinteresse (siehe Abbildung 1) schnell wandelt.

### 3.1 Methodisches Vorgehen bei Recherche und Auswahl der empirischen Studien

Das methodische Vorgehen des vorliegenden Reviews gründet auf den „Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses“ (PRISMA, vgl. Liberati et al. 2009). Neben allgemeinen Fragen zu bevorzugten Zielgruppen, Fachbereichen und eingesetzter Technik, sind vor allem die erzielten Effekte von Interesse und inwieweit es dabei gelingt, Technik im Kontext sozialer und humaner Beziehungen abzubilden (siehe Tabelle 2).

Tab. 2: Forschungsfragen

<b>RQ1</b>	Welche Zielgruppen werden von den AR-Anwendungen adressiert?
<b>RQ2</b>	Welche Fachbereiche der Technik werden von den AR-Anwendungen thematisiert?
<b>RQ3</b>	Welche Dimensionen des Technikbegriffs werden abgedeckt?
<b>RQ4</b>	Welche positiven Effekte können durch den Einsatz von AR in der Technikdidaktik erzielt werden?
<b>RQ5</b>	Welche Technologien liegen den AR-Anwendungen zu Grunde?

Da eine Suche nach deutschsprachigen Studien zu keiner ausreichend großen Stichprobe führt, wurde die Suche mit den englischen Schlagwörtern „Augmented Reality“, „Engineering“, „Education“, „Learning“ und „Teaching“ durchgeführt (siehe Tabelle 3). Um eine große Bandbreite an Veröffentlichungen zu erhalten, wurde die Suche mit dem Recherche-Tool „Publish or Perish“ durchgeführt, die zu 430 Treffern führte. Zusätzlich konnten weitere 951 Treffer in der Datenbank „IEEE Xplore“ erzielt werden (siehe Abbildung 2). Um die Aktualität der Ergebnisse sicherzustellen, aber gleichzeitig eine repräsentative Auswahl zu erhalten, wurde der Suchzeitraum auf Veröffentlichungen der Jahre 2010–2020 eingegrenzt.

Tab. 3: Verwendete Suchbegriffe

Datenbank	Suchauftrag 02-08-2021
IEEE Xplore	„All Metadata“:Augmented Reality AND „All Metadata“engineering AND („All Metadata“ education OR „All Metadata“:learning OR „All Metadata“:teaching)
Google Scholar	Augmented Reality AND engineering

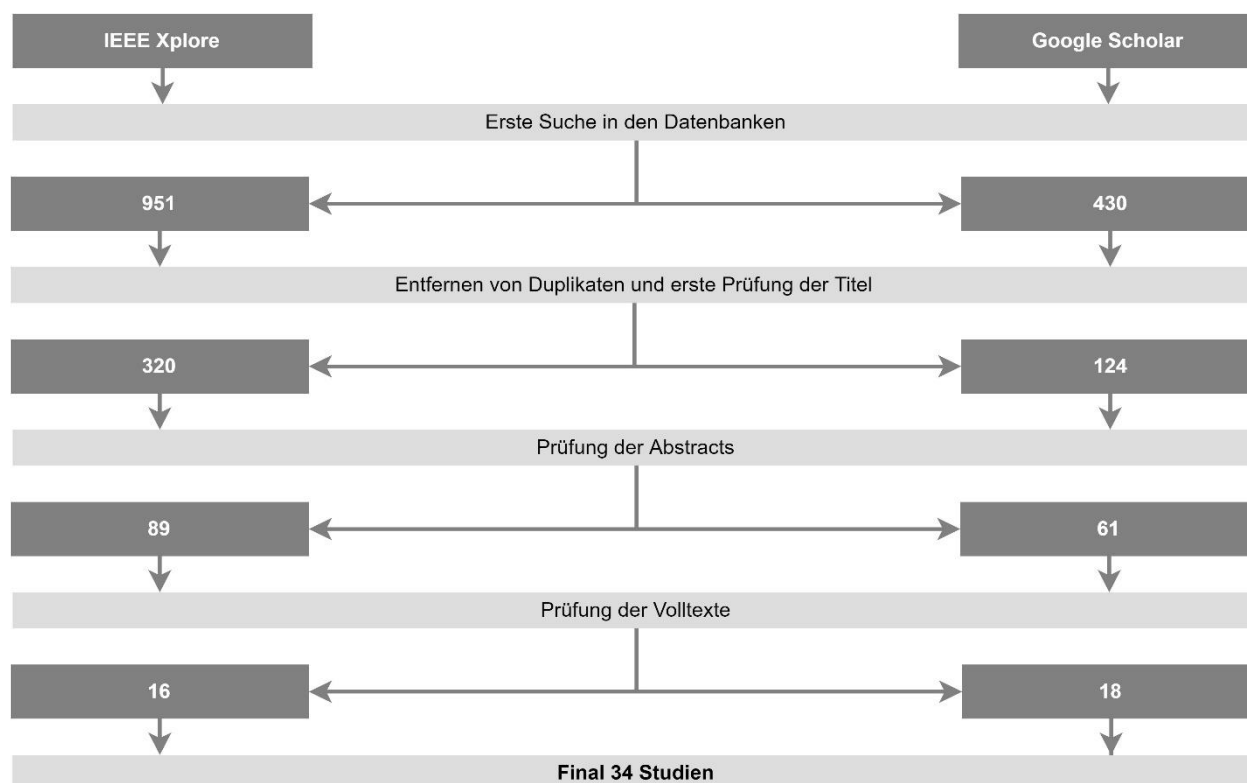


Abb. 2: Auswahlprozess in Anlehnung an PRISMA (vgl. Liberati et al. 2009)

Im anschließenden Auswahlprozess wurde darauf geachtet, dass den jeweiligen Studien erstens eine konkrete AR zugrunde liegt und zweitens ein nachweisbarer Effekt der AR im Lehr-/ Lernkontext dokumentiert wurde (siehe Tabelle 4). Zu den Effekten zählen kognitive Leistungen, wie eine Verbesserung der Lernleistung, ein besseres Verständnis von Thematik und Zusammenhängen, aber auch psychologische Effekte, wie eine höhere Motivation oder gesteigertes Interesse für die Inhalte sowie Auswirkungen auf die Task Performance und Kreativleistung. Nicht berücksichtigt wurden Studien, in denen lediglich Usability oder Technologieakzeptanz erhoben wurden. Unter Anwendung dieser Kriterien wurden die Ergebnisse zunächst manuell, anhand des Titels, auf Verwertbarkeit geprüft, wobei Duplikate, Reviews oder thematisch eindeutig unpassende Artikel aussortiert wurden, wodurch sich die Anzahl auf 320 (IEEE Xplore) / 124 (Google Scholar) Studien reduzierte. Im nächsten Durchgang wurden die Abstracts der verbliebenen Studien unter Anwendung der Auswahlkriterien (siehe Tabelle 4) gesichtet. Die 89 (IEEE Xplore) / 61 (Google Scholar) dadurch verbliebenen Studien wurden einer weiteren, eingehenden Überprüfung der Volltexte unterzogen, woraufhin insgesamt 16 (IEEE Xplore) / 18 (Google Scholar) für das Review berücksichtigt werden konnten.

Tab. 4: Auswahlverfahren

Auswahlkriterien	Ausschlusskriterien
Effekt im Lehr- Lernkontext	Reviews und theoretische Arbeiten
Konkrete AR-Anwendung	Reine Usability Evaluation
Deutsch- und englischsprachige Studien	Reine Erhebung der Technologieakzeptanz
$n \geq 30$	Duplikate

Bei der Auswertung werden sowohl didaktische als auch AR-typische Merkmale erhoben. Zu den didaktischen Merkmalen zählt die Erfassung der Zielgruppen, die sich grob am amerikanischen Schulsystem orientiert, da der Großteil der Studien aus dem englischsprachigen Raum stammt. Von Interesse ist auch die inhaltliche Thematik der Anwendungen, um daraus mögliche Schlüsse über die Verteilung der Fachbereiche, innerhalb der Technikdidaktik, ziehen zu können. Um einen besseren Überblick zu den didaktischen Rahmenbedingungen zu erhalten, wird zudem erhoben, ob die jeweilige Anwendung im Zusammenhang mit einem Curriculum eingesetzt wurde. Eine solche Einbettung liegt vor, wenn die Anwendung zum Beispiel nur Teil einer Unterrichtseinheit ist, in der zusätzlich auch andere Unterrichtsmethoden genutzt werden. Auf fachspezifischer Seite kann Technik des Weiteren in eine humane, soziale und naturale Dimension aufgeschlüsselt werden (vgl. Ropohl 2009, S. 29–43), weshalb z. B. der 'Mehrperspektivische Ansatz' der Technikdidaktik ein möglichst ganzheitliches Bild technischer Artefakte, im Zusammenspiel mit Mensch und Gesellschaft, bieten möchte (vgl. Sachs 2001; Schmayl 2010, S. 128–133). Aus diesem Grund wird im Rahmen des Reviews erhoben, ob die untersuchten Anwendungen auf inhaltlicher Ebene unterschiedliche Dimensionen beleuchten, die behandelten Inhalte also in einem größeren Kontext betrachten, oder lediglich deklaratives/ prozedurales Wissen oder Fertigkeiten bezüglich technischer Artefakte vermitteln. Des Weiteren wird ermittelt, ob die AR explizit kollaboratives Lernen fördert, sowie die Fähigkeit der Anwendung Inhalte adaptiv an die Voraussetzungen der Lernenden anzupassen, oder zumindest Hilfestellungen in Form von Tutorials, Hinweisen oder Hilfsfunktionen anzubieten.

Auf technologischer Seite wird zunächst zwischen stationären und mobilen Anwendungen unterschieden (vgl. Carmigniani 2011). Stationäre Anwendungen zeichnen sich dadurch aus, dass sie an ein komplexes Setting gebunden sind. Darunter fallen alle Systeme, die auf nicht portable Hardware angewiesen sind. Bei mobilen Anwendungen kommen in der Regel Smartphones oder Tablets zum Einsatz und es wird nur auf portable Hardware, wie zum Beispiel ortsunabhängige Tangibles oder Marker zurückgegriffen. Die weiteren Kategorien basieren auf den drei grundlegenden Voraussetzungen einer AR, zu denen die Displaytechnik, das Tracking-Verfahren und die Interaktionsform gehören (vgl. Azuma 1997; Azuma et al. 2001; Billinghurst et al. 2014). Für die Displaytechnologie werden die gängigen Kategorien „optical see-through“, „video see-through“ und „projection-based“ (vgl. Billinghurst et al. 2014; Carmigniani et al. 2010; Chatzopoulos 2017), sowie zusätzlich der Vermerk, ob es sich um ein Head-Mounted Display (vgl. van Krevelenand 2010) handelt, zu Grunde gelegt. Zur Einordnung des Tracking-Verfahrens wird auf eine stark vereinfachte Kategorisierung in „image-based“ und „location-based“ zurückgegriffen (Cheng & Tsai 2012; vgl. Pence 2010). Unter „image-based“ fallen nach Cheng und Tsai (2012) sowohl markerlose optische Verfahren, die auf der Auswertung von komplexen Bildinhalten basieren, als auch weniger rechenintensive, markerbasierte Verfahren, wie die Erkennung von QR-Codes. Allerdings wird diese Einteilung nicht dem Umstand gerecht, dass Bilderkennungsverfahren, denen extra dafür vorgesehene Marker zu Grunde liegen, immer eine Präparation der Umgebung/ der

Objekte voraussetzen, während andere optische Tracking-Methoden ihre Informationen selbstständig aus der Umgebung beziehen. Um dies zu berücksichtigen, wird die Kategorie „fiducials“ (Billinghurst et al. 2014) hinzugefügt, die alle Tracking-Methoden einschließt, welche künstliche Marker verwenden. Unter „image-based“ fallen somit nur noch die Verfahren, die eine Verortung über Auswertung optischer Gegebenheiten der natürlichen Umgebung vornehmen (vgl. Billinghurst et al. 2014, „Natural Feature Tracking“). Das Attribut „location-based“ umfasst schließlich alle signalbasierten Verfahren, wie GPS oder WiFi (vgl. Cheng & Tsai 2012). Auch bei der Kategorisierung von Interaktionsformen wird nur eine grobe Einteilung vorgenommen. Erfasst werden Interaktionsformen, die eine Steuerung mittels Controller erlauben, worunter sowohl die von LaViola (2017) als traditionell bezeichneten Eingabegeräte, wie Joysticks und Tastaturen, als auch die Bedienung einer Anwendung über den Touchscreen eines mobilen Endgeräts fallen. Neben Controllern stellen Tangibles eine weitere Möglichkeit zur Interaktion dar (vgl. Billinghurst et al. 2014; Carmigniani et al. 2010; Chatzopoulos 2017; van Krevelenand 2010). Während Controller zusätzliche Werkzeuge sind, die allein dem Zweck dienen, eine Verbindung zwischen Nutzenden und System herzustellen, sind Tangibles darüber hinaus ein wesentlicher Teil der Darstellung. Anschaulich umgesetzt wird dies am oft zitierten Projekt „Urp“ (vgl. Underkoffler & Ishii 1999). In dieser Anwendung können physische Modelle von Gebäuden auf einer Arbeitsfläche positioniert werden, die deren Position erkennt und je nach Ausrichtung und gewählter Tageszeit den passenden Schattenwurf berechnet, der dann in Echtzeit auf die Szene projiziert wird. Eine Manipulation der Modelle, also der Tangibles, ermöglicht so einen direkten Zugriff auf die zugrundeliegenden digitalen Informationen des Systems (vgl. Ishii 2008), ohne die Verwendung abstrakter Controller. Aufgrund ihres Funktionsprinzips werden Tangibles häufig in Verbindung mit AR erwähnt, können aber nicht automatisch damit gleichgesetzt werden, da trotz allem oft unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt werden (vgl. Ullmer & Ishii 2001). Ein differenzierter Konsens über die Definition von Tangibles besteht nicht, weshalb sie im Rahmen dieses Reviews als physische Objekte definiert werden, die einen inhaltlichen Bezug zur Anwendung und durch sinntragende Interaktion direkten Einfluss auf den digitalen Output haben. Einschränkend muss erwähnt werden, dass die hier vorgenommene Definition keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit erhebt und lediglich als theoretischer Rahmen dieser Arbeit dient. Die zuvor erwähnten, zweidimensionalen Marker, deren Zweck nur im Tracking besteht, ohne dabei selbst von inhaltlicher Relevanz zu sein, sind somit, trotz ihrer physischen Natur, keine Tangibles. Die Tatsache, dass Position und Rotation dieser Marker prinzipiell an die der digitalen Inhalte gekoppelt sind, wie zum Beispiel in der Anwendung von Martín-Gutiérrez, González und Domínguez (2012), reicht nicht aus, um an dieser Stelle von Tangibles sprechen zu können, solange diese Manipulationen keine tiefere Bedeutung haben. Ein Beispiel für sinntragende Interaktion, mit tieferer Bedeutung, ist die Anwendung von Sittiyuno und Chaipah (2019). Die Anwendung besteht zwar aus zweidimensionalen Markern, diese repräsentieren jedoch jeweils einen Teil eines Programmcodes und können durch korrekte Anordnung zu einem funktionsfähigen Programm zusammengefügt werden. Ziel ist es dabei Schüler/-innen auf einfache Art und Weise das Programmieren beizubringen. Da die manuelle Interaktion mit diesen Markern im Vordergrund steht und dabei auf sinntragende Weise der digitale Output generiert und verändert wird, kann in diesem Fall von Tangibles gesprochen werden. Auf diese Weise physische Objekte einzubinden, kann natürliche Formen der Interaktion fördern, die im Review unter der Bezeichnung Gestensteuerung erhoben werden. Bei der Gestensteuerung handelt es sich um eine Interaktion, der möglichst intuitive Bewegungen oder Verhaltensweisen zugrunde liegen (vgl. Billinghurst et al. 2014; LaViola 2017). Hierunter fallen auch weitere natürliche Formen der Interaktion, wie zum Beispiel die Sprachsteuerung (vgl. LaViola 2017).

In enger Verbindung zur Interaktion steht die sensorische Wahrnehmung der Nutzenden. Erhoben werden in dieser Kategorie die, von der Anwendung und dem damit verbundenen Szenario, aktiv einbezogenen Sinnesmodalitäten. Zur Auswahl stehen demnach die visuelle, die auditive, die taktile, die olfaktorische und die gustatorische Wahrnehmung. Die taktile Wahrnehmung entsteht, nach Wünschmann und Fourney (2005), durch „human activities (interactions), based on haptic perception, in combination with purpose oriented (goal driven) motor actions.“ Damit wird eine klare Unterscheidung zur haptischen Wahrnehmung vorgenommen, die als „passive perception only“, definiert wird, was bedeutet, „that no motor actions with the purpose of getting the haptic information are involved“ (Wünschmann & Fourney 2005). Ähnlich wie bei der vorherigen Definition von Tangibles, beschreibt taktil, im Rahmen dieses Reviews, eine sinnhafte Auseinandersetzung gegenständlicher Natur, die über das bloße Drehen und Wenden eines Markers zum Zweck multiperspektivischer Betrachtung hinausgeht.

Im Gegensatz zur Interaktion, die einen Handlungsprozess beschreibt, wird die Interaktivität des Systems, also die von ihm bereitgestellten Handlungsmöglichkeiten, in diesem Review, unter Verwendung des sechsstufigen Modells von Schulmeister (2002) bewertet. Kurz zusammengefasst, bieten Anwendungen auf Stufe I die Möglichkeit Objekte zu betrachten und zu rezipieren, weshalb sie lediglich „[...] die Funktion der Illustration oder Information“ (Schulmeister, 2002), bei gleichbleibendem Inhalt erfüllen. Stufe II bietet als Erweiterung die Möglichkeit verschiedene Darstellungen zu betrachten, indem zum Beispiel durch vordefinierte Inhalte navigiert werden kann. Eine „direkte Manipulation der Komponente“ (Schulmeister 2002), bei der die Darstellung aktiv variiert werden kann, wird auf Stufe III unterstützt. Dreidimensionale Objekte können dabei zum Beispiel rotiert oder skaliert werden. Noch mehr Einfluss erhalten Nutzende auf Stufe IV: „Auf dieser Stufe ist der Inhalt der Multimedia-Komponenten nicht vorgefertigt, sondern wird auf Anforderung durch den Benutzer erst erzeugt“ (Schulmeister 2002). Kreative Interaktion wird auf Stufe V möglich, „wenn dem Benutzer im Lernprogramm Werkzeuge zur Verfügung stehen, mit denen er selbst Objekte kreieren, Ideen visualisieren oder Modelle entwerfen kann“ (Schulmeister 2002). Die sechste und somit höchste Stufe ist erreicht, wenn das System in der Lage ist auf die Handlungen Nutzender „mit entsprechend bedeutungsvollen Handlungen“ zu antworten (Schulmeister 2002). Bekannte Beispiele für eine sinnhafte Interaktion sind Sprachassistenten wie Apples „Siri“ oder Amazons „Alexa“, denen eine künstliche Intelligenz (KI) zu Grunde liegt.

### 3.2 Auswertungsergebnisse der recherchierten Studien

Mit 73,5 % wurde die Mehrheit der betrachteten Anwendungen im universitären Umfeld an Studierenden getestet (siehe Tabelle 5). Nur 17,65 % Anwendungen wurden für Grundschüler/-innen konzipiert, 2,95 % für Schüler/-innen der Mittelstufe, 2,95 % für Schüler/-innen der Oberstufe und in ebenfalls 2,95 % der Studien richtet sich die Anwendung an Mitarbeitende von Unternehmen.

Tab. 5: Zielgruppen in den untersuchten Studien

<b>Zielgruppe</b>	<b>Anzahl %</b>
Universität	73,5
Grundschule	17,65
Mittelstufe	2,95
Oberstufe	2,95
Unternehmen	2,95

Mit 26,5 % sind Themen aus der Elektrotechnik (siehe Tabelle 6), dicht gefolgt von Themen im Bereich des Technischen Zeichnens mit 20,6 % am häufigsten vertreten. Die Felder Industrietechnik und Maschinenbau werden inhaltlich beide mit 11,8 % behandelt.

Tab. 6: Fachbereiche

<b>Fachbereich</b>	<b>Anzahl %</b>
Elektrotechnik	26,5
Technisches Zeichnen	20,6
Industrietechnik	11,8
Maschinenbau	11,8
Mathematik und Geometrie	8,8
Nachhaltige Energie	8,8
Arbeitssicherheit	2,9
Automotive	2,9
Bauingenieurwesen	2,9
Engineering Physics	2,9
Geowissenschaften	2,9

In 17,6 % der Lehr-/ Lernszenarien werden, neben der naturalen Dimension der Technik, auch soziale Aspekte Gegenstand der Betrachtung. Ein Lernerfolg, in Form eines erfolgreichen Wissenstransfers, konnte in 47,1 % der Studien nachgewiesen werden (siehe Tabelle 7). Ein Lernerfolg, in Form eines besseren Verständnisses von Inhalt und Thematik, wurde in 2,9 % der Studien dokumentiert. Insgesamt 32,4 % der Anwendungen sind auf eine Verbesserung des räumlichen Vorstellungsvermögens ausgerichtet. 14,7 % der Studien untersuchten die Auswirkungen der AR auf die Performance, im Sinne einer verbesserten Arbeitsleistung und in einer Schulung zur Cyber Security (entspricht 2,9 %) ließ sich durch den Einsatz von AR das Bewusstsein für die Gefahren im Internet steigern.

Tab. 7: Effekte

Effekte	Anzahl %
Wissenserwerb	47,1
Räumliches Vorstellungsvermögen	32,4
Performance	14,5
Motivation	11,8
Kreativität	5,9
Awareness	2,9
Engagement	2,9
Sonstige	2,9
Verständnis	2,9

In 61,8 % der vorliegenden Studien wurde die AR innerhalb eines didaktischen Rahmens im Lehr-/ Lernkontext eingesetzt, während in 38,2 % der Studien keine explizite Einbettung in ein Curriculum vorlag. Virtuelle Hilfestellungen sind in 23,5 % der betrachteten Anwendungen implementiert, wohingegen 32,4 % Lehr-/ Lernszenarien Hilfestellung durch Lehrkräfte vorsehen. Nur 5,9 % der vorliegenden Studien bietet adaptive Funktionen (vgl. Paramythis & Loidl-Reisinger 2004; Shute & Towle 2003), mit denen auf individuelle Bedürfnisse der Lernenden eingegangen wird. In 20,6 % der Lehr-/ Lernszenarien ist explizit kollaboratives Arbeiten mit der AR vorgesehen. Stationäre (52,9 %) und mobile (47,1 %) Anwendungen werden nahezu mit gleicher Häufigkeit eingesetzt (siehe Tabelle 8).

Tab. 8: Hardware

Setup	Anzahl %
Stationär	52,9
Mobil	47,1

Bei der Displaytechnik haben, mit 88,2 % der Anwendungen, die videobasierten Geräte einen klaren Vorsprung (siehe Tabelle 9). In 11,8 % der Szenarien wird ein HMD verwendet, in drei dieser Fälle (entspricht 8,8 % aller betrachteten Studien) wird dabei ein optisches Display eingesetzt. Nur 2,9 % der Anwendungen arbeiten mit Projektionen.

Tab. 9: Displaytechnik

Displaytechnik	Anzahl %
Video see-through	88,2
HMD	11,8
Optical see-through	8,8
Projection-based	2,9

Das Tracking geschieht hauptsächlich (88,2 %) über künstliche Marker, sogenannte „fiducials“ (siehe Tabelle 10). In 41,2 % der Anwendungen bieten diese Marker gleichzeitig die Möglichkeit, durch Rotation, die virtuellen Objekte aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten. In 8,8 % der Anwendungen kommen bildbasierte Tracking-Verfahren zum Einsatz, die keine Präparation der Umgebung erfordern. In einer der projektionsbasierten Szenarien (entspricht 2,9 % aller betrachteten Studien) muss ein Tracking in diesem Sinne nicht vorgenommen werden, da sich die Projektionsfläche nicht bewegt. Keine der Studien beschreibt ein Outdoor-Szenario, womit sich erklärt, dass signalbasierte Verfahren, wie GPS gar nicht vertreten sind.

Tab. 10: Tracking

Tracking-Verfahren	Anzahl %
Fiducials	88,2
Image-based	8,8
Kein Tracking	2,9

Bei der Bedienung wird größtenteils (85,3 %) auf Controller gesetzt, die in 47,1 % der Anwendungen in Form des Smartphones/ Tablets realisiert sind (siehe Tabelle 11). Des Weiteren kommen in 29,4 % der Anwendungen Tangibles zum Einsatz, die in 14,7 % der Fälle zusätzlich zu Controllern verwendet werden. Eine Gestensteuerung ist in 32,4 % der Anwendungen möglich und wird in 17,6 % der Anwendungen durch Controller erweitert.

Tab. 11: Interaktionsform

Interaktion	Anzahl %
Controller	85,3
Tangibles	29,4
Gestensteuerung	32,4

In 29,4 % der Anwendungen, wird als Erweiterung der visuellen Darbietung, die wie zu erwarten war, in allen Anwendungen gegeben ist, zusätzlich eine taktile Komponente integriert. Auffällig ist, dass nur 17,6 % der Studien explizit die Verwendung auditiver Elemente erwähnen.

Bei der Interaktivität zeigt sich klar, dass die Möglichkeit die Repräsentationsform zu variieren, z. B. unterschiedliche Perspektiven zu wählen oder Objekte im Raum zu drehen, in den betrachteten Anwendungen am häufigsten (58,8 %) angeboten wird (siehe Tabelle 12), was u. a. darauf zurückzuführen ist, dass AR als Medium das multiperspektivische Betrachten von Objekten im Raum oft bereits impliziert. Vor allem Anwendungen deren Ziel es ist, das räumliche Vorstellungsvermögen zu trainieren (vgl. Martín-Gutiérrez et al. 2012; Veide & Dobelis 2014) und dazu auf die Visualisierung von geometrischen Objekten zurückgreifen, bieten diesen Level an Interaktivität. Inhalte dynamisch zu verändern oder zu erstellen, wird von 26,5 % der Anwendungen unterstützt. In der Anwendung von Lucas und Kollegen (2018) lassen sich so zum Beispiel physische Bausteine zu einem Schaltkreis zusammenbauen, der je nach verwendeten Komponenten virtuell mit korrespondierenden Messergebnissen überlagert wird. Die Anwendung von McNeal (2019) erreicht dieses Ziel, indem durch Aufhäufen oder Abtragen von Sand, in einem physischen Sandkasten, die vom System darauf projizierten, topographischen Informationen in Echtzeit verändert



werden können. Eigene Prozesse zu gestalten, wie dies für Stufe V des Modells von Schulmeister (2002) typisch ist, bietet unter den ausgewerteten Anwendungen nur das System von Villanueva und Kollegen (2020), in dem zumindest die Instrukturen eigene Lernszenarien entwerfen können. Eine sinnhafte Kommunikation mit dem System, wie sie für Stufe VI gefordert ist, wird von keiner der Anwendungen realisiert.

Tab. 12: Interaktivität nach Schulmeister (2002)

Interaktivität	Anzahl %
Stufe I: Objekte betrachten und rezipieren	2,9
Stufe II: Multiple Darstellungen betrachten und rezipieren	5,9
Stufe III: Die Repräsentationsform variieren	58,8
Stufe IV: Den Inhalt der Komponente beeinflussen	29,4
Stufe V: Das Objekt bzw. den Inhalt der Repräsentation konstruieren und Prozesse generieren	2,9
Stufe VI: Konstruktive und manipulierende Handlungen mit situationsabhängigen Rückmeldungen	0

#### 4 Diskussion

Ins Auge fällt besonders, dass Studierende an Universitäten mit 73,5 % die Hauptzielgruppe der untersuchten Studien ausmachten, wohingegen bei Ibáñez und Delgado-Kloss (2018) Schüler/-innen der Middleschool und bei Sirakaya und Sirakaya (2020) Schüler/-innen der Sekundarstufe den Großteil der Probanden stellten. Eine Erklärung dafür könnte die Ausrichtung der beiden Reviews an den „Next Generation Science Standards“ (NGSS) sein, welche vornehmlich für Primar- und Sekundarstufe (im englischsprachigen Raum K-12) entwickelt wurden. Auch bei der Verteilung der Studien auf die einzelnen Fachbereiche sind Unterschiede festzustellen, was sich ebenfalls aus der Gliederung der NGSS in „Physical Science“, „Life Science“, „Earth & Space Science“ und „Engineering, Technology & Applications of Science“ heraus erklärt. Während im vorliegenden Review nur Studien berücksichtigt werden, in denen ein klarer Bezug zur Technikdidaktik hergestellt wird, ist die Bandbreite der NGSS mit den zusätzlichen Disziplinen „Physical Science“, „Life Science“ und „Earth & Space Science“ wesentlich größer.

Thematisch findet in den meisten der untersuchten Anwendungen eine ausschließlich rationale Betrachtung technischer Konzepte, Artefakte oder Sachverhalte statt, wobei lebensweltliche Bezüge außen vor bleiben. Dabei ist es gerade das Wechselspiel der Technik mit sozialen und humanen Aspekten (vgl. Ropohl 2009, S. 29–43), das es Lernenden ermöglicht, einen Zugang dazu zu finden. Auffallend ist zum Beispiel, dass in 32,4 % der Studien speziell das räumliche Vorstellungsvermögen adressiert wird, was sich wiederum mit den Ergebnissen anderer Reviews deckt (vgl. Akçayır & Akçayır 2017). Die Förderung prozeduraler Fähigkeiten hat zwar ihre Berechtigung und der Erfolg der Maßnahmen spricht für sich, schöpft aber das Potenzial noch lange nicht aus. Umso erfreulicher ist es, dass von einigen Studien bewusst Themen aufgegriffen werden, die für den verantwortungsbewussten Umgang im Rahmen technischen Handelns sensibilisieren. So wird zum Beispiel mit der Anwendung von Salehuddin und Kollegen (2019) bereits Grundschüler/-innen die Bedeutung von erneuerbaren Energien nähergebracht. Und auch Theodorou und Kollegen (2018) greifen dieses Thema auf.

Bei der technischen Umsetzung der betrachteten Anwendungen fällt auf, dass die auditive Wahrnehmung kaum Beachtung findet. Zwar kann nicht grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass Anwendungen über keine auditiven Elemente verfügen, nur weil dies in den Studien nicht explizit erwähnt wird, aber es kommt ihnen offensichtlich nicht der Stellenwert zu, der ihnen bei der Wahrnehmung und vor allem auch beim Lernprozess zugeschrieben wird. Erwähnt seien hier nur Meyers (2004) Ausführungen zum multimedialen Lernen, die eindeutig den Mehrwert audiovisueller Darbietungen hervorheben. Auch die Interaktivität der entwickelten Anwendungen beschränkt sich hauptsächlich auf die Möglichkeit dreidimensionale Objekte multiperspektivisch betrachten zu können, was natürlich einen großen Mehrwert von AR darstellt, aber noch Spielraum nach oben lässt. Gerade konstruktive Prozesse, wie sie im Modell von Schulmeister (2002) auf Stufe IV beschrieben werden, könnten eine Bereicherung für die Vermittlung technischer Konzepte darstellen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass sich AR aufgrund medienspezifischer Vorteile einen Platz im Lehr-/ Lernkontext gesichert hat. Positive Erkenntnisse aus jahrelanger Forschung und gesunkene technische Voraussetzungen haben zu einer gestiegenen Nachfrage geführt. Die Möglichkeiten multimodaler Darbietungen, durch Kombination von Sehen, Hören und Fühlen scheinen jedoch noch lange nicht ausgeschöpft zu sein. Gleiches gilt für die Ausgestaltung der Interaktivität. Generell ist das Angebot an Anwendungen im Bereich der Technikdidaktik überschaubar. Vorausgesetzt „jede Invention ist eine Intervention, eine Intervention in Natur und Gesellschaft“ (Ropohl 2009, S. 43–44), dann kommen diese Verflechtungen auch deutlich zu kurz, wenn es um die inhaltliche und didaktische Ausgestaltung von AR-Anwendungen in der technischen Bildung geht.

## Literatur

- Akçayır, M., & Akçayır, G. (2017). Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational Research Review*, 20, 1–11.
- Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. *Presence*, 6(4), 355–385.
- Azuma, R., Baillot, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., & MacIntyre, B. (2001). Recent Advances in Augmented Reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 6, 34–47.
- Billinghurst, M., Clark, A., & Lee, G. (2014). A Survey of Augmented Reality. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, 8(2-3), 73–272.
- Carmigniani, J., Furht, B., Anisetti, M., Ceravolo, P., Damiani, E., & Ivkovic, M. (2011). Augmented reality technologies, systems and applications. *Multimedia Tools and Applications*, 51, 341–377.
- Chatzopoulos, D., Bermejo, C., Huang, Z., & Hui, P. (2017). Mobile Augmented Reality Survey: From Where We Are to Where We Go. *IEEE Access*, 5, 6917–6950.
- Cheng, K.-H., & Tsai, C.-C. (2012). Affordances of Augmented Reality in Science Learning: Suggestions for Future Research. *Journal of Science Education and Technology*, 22.
- Cipresso, P., Giglioli, I. A. C., Raya, M. A., & Riva, G. (2018). The Past, Present, and Future of Virtual and Augmented Reality Research: A Network and Cluster Analysis of the Literature. *Frontiers in Psychology*, 9, 2086.
- Clark, R. C., & Meyer, R. E. (2011). *E-Learning and the Science of Instruction*. San Francisco: Pfeiffer.
- Diegmann, P., Schmidt-Kraepelin, M., Eynden, S., & Basten, D. (2015). Benefits of Augmented Reality in Educational Environments – A Systematic Literature Review. *Wirtschaftsinformatik Proceedings 2015*, 103, 1542–1556.
- Dörner, R., Broll, W., Grimm, P., & Jung, B. (2019). *Virtual und Augmented Reality (VR/AR) (2 ed.)*. Berlin: Springer Vieweg.
- Garzón, J., Pavón, J., & Baldiris, S. (2019). Systematic review and meta-analysis of augmented reality in educational settings. *Virtual Reality*, 23, 447–459.

- Graube, G. (2018). Kompetenzen für die digitale Gesellschaft. Herausforderungen für Technikbildung in der Schule. In B. Geißel & T. Gschwendtner (Hrsg.), *Wirksamer Technikunterricht*, Band 10 (S. 44–54). Hohengehren: Schneider.
- Halupka, V. (2016). Augmented Reality in Engineering Education: Current Status and Future Opportunities. *AAEE2016 CONFERENCE*, 1–8.
- Harzing, A-W, (2020, January 21). Publish or Perish. <https://harzing.com/resources/publish-or-perish>.
- Ibáñez, M.-B., & Delgado-Kloss, C. (2018). Augmented reality for STEM learning: A systematic review. *Computers & Education*, 123, 109–123.
- IEEE (2021, January 21). IEEE Xplore. <https://ieeexplore.ieee.org/search/advanced>
- Ishii, H. (2008). *Tangible Bits: Beyond Pixels*. Proceedings of the 2nd International Conference on Tangible and Embedded Interaction, xv–xxv. Bonn, Germany: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/1347390.1347392>
- Kerres, M. (2020). Bildung in der digitalen Welt. Eine Positionsbestimmung für die Lehrerbildung. In M. Rothland & S.Herrlinger (Eds.), *Digital?! Perspektiven der Digitalisierung für den Lehrerberuf und die Lehrerbildung* (S. 17–35). Münster: Waxmann.
- Krevelenand, V. D. W. F., & Poelman, R. (2010). A Survey of Augmented Reality Technologies, Applications and Limitations. *The International Journal of Virtual Reality*, 9(2), 1–20.
- Krug, M., Czok, V., Müller, S., Weitzel, H., Huwer, J., Kruse, S. & Müller, W. (2022). Ein Bewertungsraster für Augmented Reality Lehr-Lernszenarien im Unterricht. *ChemKon*.
- LaViola, J. J., Kruijff, E., McMahan, R. P., Bowman, D. A., & Poupyrev, I. (2017). *3D User Interfaces Theory and Practice* (2 ed.). London: Pearson Education.
- Liberati, A., Altman, D. G., Tetzlaff, J., Mulrow, C., Gøtzsche, P. C., Ioannidis, J. P. A., Clarke, M., Devereaux, P. J., Kleijnen, J., & Moher, D. (2009). The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration. *BMJ*, 339. <https://doi.org/10.1136/bmj.b2700>
- Majeed, Z. H., & Ali, H. A. (2020). A review of augmented reality in educational applications. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, 7(62), 20–27.
- Mayer, R. E. (2014). *The Cambridge Handbook of Multimedia Learning* (2 ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Next Generation Science Standards (2021, February 10). How to Read the Next Generation Science Standards (NGSS). <https://www.nextgenscience.org/standards/standards>
- Paramythi, A., Loidl-Reisinger, S. (2004). Adaptive Learning Environments and e-Learning Standards. *Electronic Journal on e-Learning*, 2(1), 181–194.
- Pence, H. E. (2010). Smartphones, Smart Objects, and Augmented Reality. *The Reference Librarian*, 52(1-2), 136–145.
- Ropohl, G. (1997). Knowledge Types in Technology. *International Journal of Technology and Design Education*, 7, 65–72.
- Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik* (3 ed.). Karlsruhe: Universitätsverlag.
- Sachs, B. (2001). Technikunterricht. Bedingungen und Perspektiven. *tu – Zeitschrift für Technik im Unterricht* 26(100), 5–12.
- Schmayl, W. (2010). *Didaktik allgemeinbildenden Technikunterrichts*. Baltmannsweiler: Schneider Verlag.
- Schulmeister, R. (2002). Taxonomie der Interaktivität von Multimedia – Ein Beitrag zur aktuellen Metadaten-Diskussion. *It+ti - Informationstechnik Und Technische Informatik*, 4, 193–199.
- Shute, V. & Towle, B. (2003). Adaptive E-Learning. *Educational Psychologist*, 38(2), 105–114).
- Sirakaya, M., & Sirakaya, D. A. (2020). Augmented reality in STEM education: a systematic review. *Interactive Learning Environments*, 0(0), 1–14.
- Sittiyuno, S., & Chaipah, K. (2019). ARCode: Augmented Reality Application for Learning Elementary Computer Programming. 2019 16th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE), 32–37. <https://doi.org/10.1109/JCSSE.2019.8864173>
- Underkoffler, J., & Ishii, H. (1999). Urp: A Luminous-Tangible Workbench for Urban Planning and Design. Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 386–393. Pittsburgh, Pennsylvania, USA: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/302979.303114>

## Untersuchte Studien:

- Arce-Lopera, C., Gomez, A., & Montoya, C. (2019). User Engagement for Collaborative Learning on a Mobile and Desktop Augmented Reality Application. 2019 International Conference on Virtual Reality and Visualization (ICVRV), 193–195. <https://doi.org/10.1109/ICVRV47840.2019.00045>
- Ayer, S., Messner, J., & Anumba, C. (2016). Augmented Reality Gaming in Sustainable Design Education. *Journal of Architectural Engineering*, 22, 4015012.
- Bairaktarova, D., Einde, L. V. D., & Bell, J. E. (2019). Using digital sketching and augmented reality mobile apps to improve spatial visualization in a freshmen engineering course. 2019 ASEE Annual Conference & Exposition.
- Cazzolla, A., Lanzilotti, R., Roselli, T., & Rossano, V. (2019). Augmented Reality to support education in Industry 4.0. 2019 18th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training (ITHET), 1–5. <https://doi.org/10.1109/ITHET46829.2019.8937365>
- Chen, Y.-C., Chi, H.-L., Hung, W.-H., & Kang, S.-C. (2011). Use of Tangible and Augmented Reality Models in Engineering Graphics Courses. *Journal of Professional Issues in Engineering Education & Practice*, 267–276.
- Flores-Amado, A., Diliegros-Godines, C. J., Trevino, J. P., Sayeg-Sánchez, G., & Gonzalez-Hernandez, H. G. (2020). Augmented Reality and Matlab® for Visuospatial Competence Development. 2020 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON), 852–858. <https://doi.org/10.1109/EDUCON45650.2020.9125205>
- Gómez-Tone, H. C., Martín-Gutiérrez, J., & Valencia Anci, L. (2020). International Comparative Pilot Study of Spatial Skill Development in Engineering Students through Autonomous Augmented Reality-Based Training. *Symmetry*, 12(9), 1401.
- Gonzalez-Franco, M., Pizarro, R., Cermeron, J., Li, K., Thorn, J., Hutabarat, W., Tiwari, A., & Bermell-Garcia, P. (2017). Immersive Mixed Reality for Manufacturing Training. *Frontiers in Robotics and AI*, 4, 3.
- Guo, W. (2018). Improving Engineering Education Using Augmented Reality Environment. In P. Zaphiris & A. Ioannou, *Learning and Collaboration Technologies. Design, Development and Technological Innovation* (pp. 233–242). Cham: Springer International Publishing.
- Guo, W., & Kim, J. H. (2020). How Augmented Reality Influences Student Workload in Engineering Education. In C. Stephanidis, D. Harris, W.-C. Li, D. D. Schmorow, C. M. Fidopiastis, P. Zaphiris, A. Ioannou, X. Fang, R. A. Sottilare, & J. Schwarz, *HCI International 2020 – Late Breaking Papers: Cognition, Learning and Games* (pp. 388–396). Cham: Springer International Publishing.
- Lin, P., & Chen, S. (2020). Design and Evaluation of a Deep Learning Recommendation Based Augmented Reality System for Teaching Programming and Computational Thinking. *IEEE Access*, 8, 45689–45699. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977679>
- Lucas, P., Vaca, D., Domínguez, F., & Ochoa, X. (2018). Virtual Circuits: An Augmented Reality Circuit Simulator for Engineering Students. 2018 IEEE 18th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT), 380–384. <https://doi.org/10.1109/ICALT.2018.00097>
- Martín-Gutiérrez, J., & Contero, M. (2011a). Improving Academic Performance and Motivation in Engineering Education with Augmented Reality. In C. Stephanidis, *HCI International 2011 – Posters' Extended Abstracts* (pp. 509–513). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Martín-Gutiérrez, J., & Contero, M. (2011b). Mixed Reality for Learning Standard Mechanical Elements. 2011 IEEE 11th International Conference on Advanced Learning Technologies, 372–374. <https://doi.org/10.1109/ICALT.2011.117>
- Martín-Gutiérrez, J., & Meneses Fernández, M. (2014). Applying Augmented Reality in Engineering Education to Improve Academic Performance & Student Motivation. *International Journal of Engineering Education*, 30, 625–635.
- Martín-Gutiérrez, J., Garcia-Dominguez, M., González, C. R., & Corredguas, M. C. M. (2013). Using different methodologies and technologies to training spatial skill in Engineering Graphic subjects. 2013 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE), 362–368. <https://doi.org/10.1109/FIE.2013.6684848>
- Martín-Gutiérrez, J., González, C. R., & Domínguez, M. G. (2012). Training of Spatial Ability on Engineering Students Through a Remedial Course Based on Augmented Reality. *Proceedings of the ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*.
- Martín-Gutiérrez, J., Navarro, R. E., & González, M. A. (2011). Mixed reality for development of spatial skills of first-year engineering students. 2011 Frontiers in Education Conference (FIE), T2D–1. <https://doi.org/10.1109/FIE.2011.6142707>
- McNeal, K. S., Ryker, K., Whitmeyer, S., Giorgis, S., Atkins, R., LaDue, N., Clark, C., Soltis, N., & Pingel, T. (2020). A multi-institutional study of inquiry-based lab activities using the Augmented Reality Sandbox: impacts on undergraduate student learning. *Journal of Geography in Higher Education*, 44(1), 85–107.

- Odenthal, B., Mayer, M. P., Kabuss, W., & Schlick, C. M. (2012). Design and evaluation of an Augmented Vision System for human-robot cooperation in cognitively automated assembly cells. *International Multi-Conference on Systems, Signals Devices*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SSD.2012.6197931>
- Poyasok, T., Chenchevoi, V., Bespartochna, O., & Chenchewa, O. (2020). Application of the Augmented Reality Technology to Training Future Electrical Engineers. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240788>
- Rymer, M. T., Damiano, E. S., McCombs, B., & Torre, R. D. L. (2018). Using Augmented Reality and Mobile Technologies to Train Automotive Technicians. *2018 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)*, 1074–1078. <https://doi.org/10.1109/TALE.2018.8615272>
- Sahin, C., Nguyen, D., Begashaw, S., Katz, B., Chacko, J., Henderson, L., Stanford, J., & Dandekar, K. R. (2016). Wireless communications engineering education via Augmented Reality. *2016 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, 1–7.
- Salazar, M., Gaviria, J., Laorden, C., & Bringas, P. G. (2013). Enhancing cybersecurity learning through an augmented reality-based serious game. *2013 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 602–607. <https://doi.org/10.1109/EduCon.2013.6530167>
- Salehuddin, M., & Kristanda, M. B. (2019). Development of Gameplay Design for Renewable Energy Learning based on Augmented Reality. *2019 IEEE R10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)(47129)*, 244–247. <https://doi.org/10.1109/R10-HTC47129.2019.9042487>
- Samat, C., & Chaijaroen, S. (2019). Design and Development of Constructivist Augmented Reality (AR) Book Enhancing Analytical Thinking in Computer Classroom. In L. Rønningsbakk, T.-T. Wu, F. E. Sandnes, & Y.-M. Huang, *Innovative Technologies and Learning* (pp. 175–183). Cham: Springer International Publishing.
- Sánchez, A., Redondo, E., Fonseca, D., & Navarro, I. (2014). Academic performance assessment using Augmented Reality in engineering degree course. *2014 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE) Proceedings*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/FIE.2014.7044238>
- Singh, G., Mantri, A., Sharma, O., Dutta, R., & Kaur, R. (2019). Evaluating the impact of the augmented reality learning environment on electronics laboratory skills of engineering students. *Computer Applications in Engineering Education*, 27(6), 1361–1375.
- Theodorou, P., Kydonakis, P., Botzori, M., & Skanavis, C. (2018). Augmented reality proves to be a breakthrough in Environmental Education.
- Ullón, H., Zambrano, D., & Domínguez, F. (2017). Smart objects for engineering labs: Boosting exploratory learning in higher education. *2017 Twelfth Latin American Conference on Learning Technologies (LACLO)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/LACLO.2017.8120915>
- Veide, Z., & Dobelis, V. S. M. (2014). Application of Augmented Reality for Teaching Descriptive Geometry and Engineering Graphics Course to First-Year Students. *ICIT 2014*.
- Villanueva, A., Zhu, Z., Liu, Z., Peppler, K., Redick, T., & Ramani, K. (2020). Meta-AR-App: An Authoring Platform for Collaborative Augmented Reality in STEM Classrooms. *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–14. Honolulu, HI, USA: Association for Computing Machinery.
- Wu, S., Liu, C., Shi, H., & Cai, S. (2019). Using Augmented Reality Technology to Learn Cube Expansion Diagram in Spatial Geometry of Elementary Mathematics. *2019 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Education (TALE)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/TALE48000.2019.9225978>
- Yu, C., Liao, Y., & Wu, C. (2016). Using augmented reality to learn the enumeration strategies of cubes. *2016 IEEE International Conference on Teaching, Assessment, and Learning for Engineering (TALE)*, 412–418. <https://doi.org/10.1109/TALE.2016.7851832>

SASCHA MÜLLER

Pädagogische Hochschule Weingarten, Technik und ihre Didaktik  
Kirchplatz 2, 88250 Weingarten  
[sascha.mueller@ph-weingarten.de](mailto:sascha.mueller@ph-weingarten.de)

DR. STEFAN KRUSE

Pädagogische Hochschule Weingarten, Technik und ihre Didaktik  
Kirchplatz 2, 88250 Weingarten  
[kruse@ph-weingarten.de](mailto:kruse@ph-weingarten.de)

---

Zitieren dieses Beitrags:

Müller, S. & Kruse, S. (2022). Systematisches Review: Augmented Reality in der technischen Bildung. *Journal of Technical Education (JOTED)*, 10(2), 42–61.